MEDICINA
Terapia génica para el corazón

ASTRONOMÍA
Historia geológica de la Luna

FÍSICA
¿Tiene el espacio un origen cuántico?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Marzo 2017 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

Una nueva herramienta para la neurociencia experimental

CEREBROS DE LABORATORIO

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

CEREBROS DE LABORATORIO | ORIGEN CUÁNTICO DEL ESPACIO | HISTORIA GEOLÓGICA DE LA LUNA

N.º 486

MARZO 2017

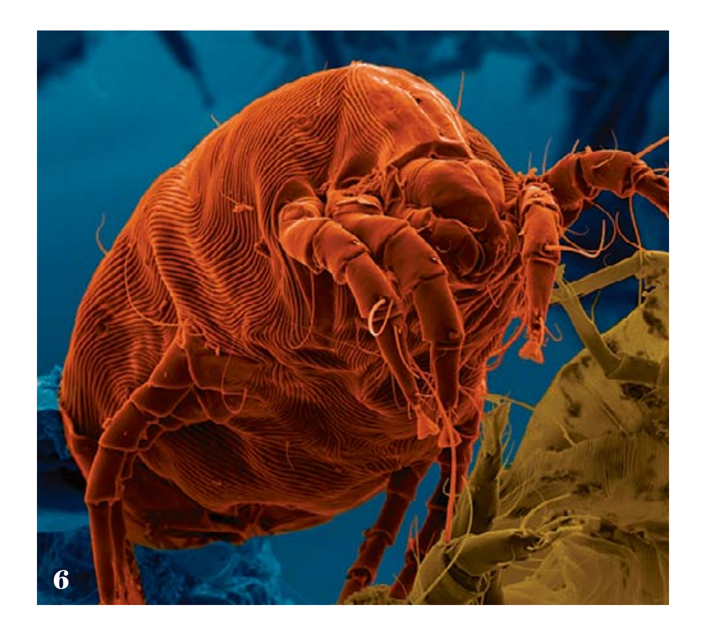


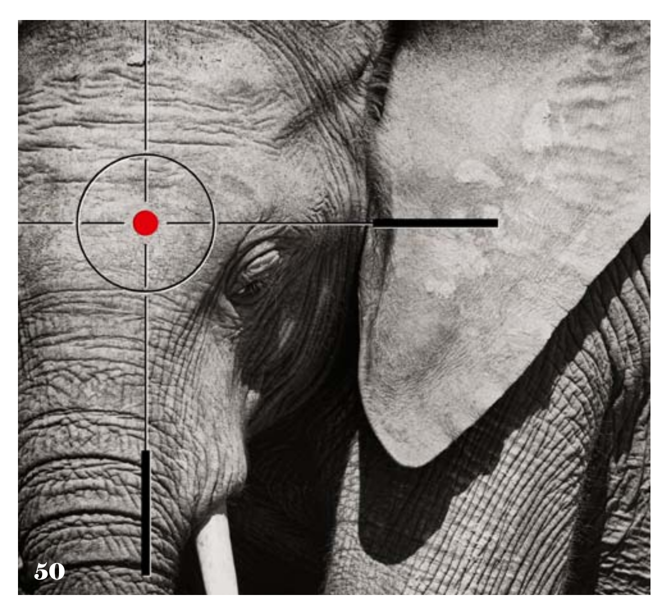
6,90 EUROS

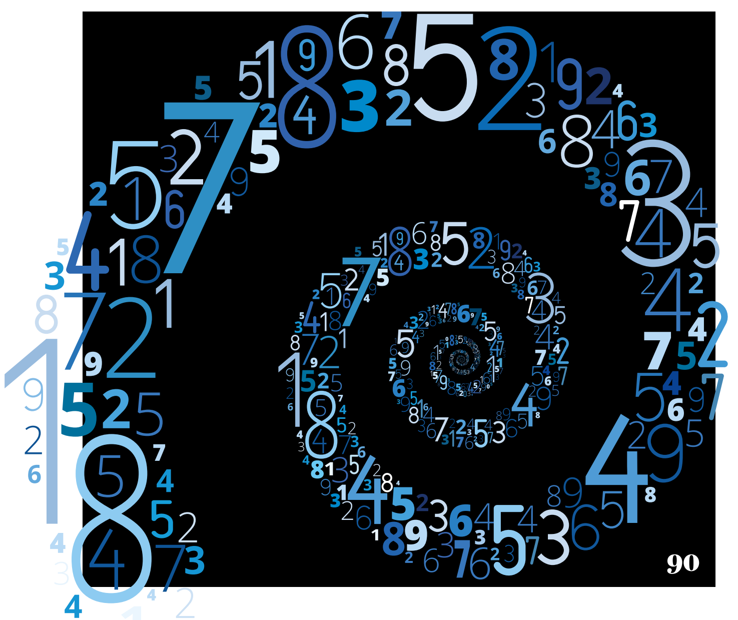


ARTÍCULOS

KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS







INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

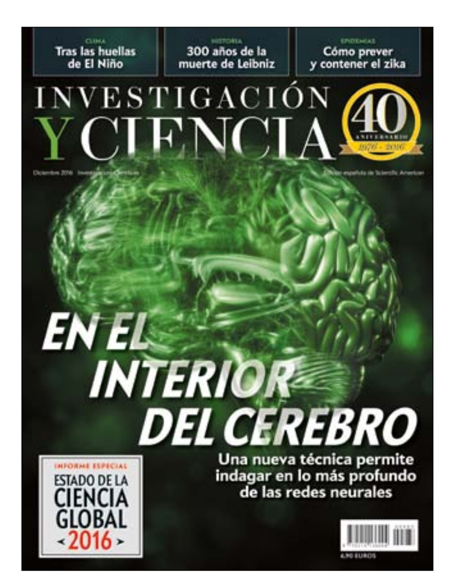
SECCIONES

EN PORTADA

Mediante técnicas novedosas, los neurocientíficos han logrado crear partes del cerebro en una placa de laboratorio. Estos «organoides» imitan el funcionamiento del cerebro humano de manera más realista que los cerebros de ratones u otros animales. De este modo, pueden emplearse para entender los mecanismos responsables de enfermedades neurológicas como el alzhéimer o la esquizofrenia. Imagen de Bryan Christie.



redaccion@investigacionyciencia.es



Diciembre 2016

LA LABOR DEL PERIODISMO CIENTÍFICO

En «El control sobre el periodismo científico» [Investigación y Ciencia, diciembre de 2016], Charles Seife critica la política de embargos reservados; es decir, la práctica por la que una institución científica restringe la difusión previa de la información a ciertas publicaciones y exige a sus periodistas que no contacten con fuentes no autorizadas antes de una fecha determinada.

Hoy en día existen demasiados periodistas científicos que malinterpretan las noticias que cubren. ¿Cómo puede una institución asegurarse de que una información que está basada en pruebas llega al público sin que, en el camino, un periodista decida apoyar una causa discordante y acientífica en nombre de un supuesto «equilibrio informativo»? Tal vez las instituciones hayan encontrado una solución en los embargos reservados.

Los ejemplos de embargo mencionados por Seife incluyen casos bastante inocuos, como cuando el Instituto de Tecnología de California contactó con anterioridad con algunos periodistas escogidos porque buscaba profesionales de primera categoría para cubrir una noticia. Otro es el caso, no representativo, de un investigador con un historial de mala praxis —y que no actuaba en nombre de ninguna gran institución gubernamental— para ofrecer información anticipada sobre un artículo de calidad dudosa. Como cabía esperar, dicho artículo fue retirado posteriormente. La mayoría de los ejemplos hacen referencia a la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) estadounidense; entre ellos, uno sobre una loable campaña antitabaco (que en líneas generales fue considerada un éxito) y otro en el que la lista de medios invitados abarcaba un amplio espectro ideológico, incluidos el *Wall Street Journal* y la agencia Politico. Todos los casos son de 2014 o antes, y el artículo no aporta pruebas de que FDA haya continuado con la práctica desde entonces.

¿Puede el autor demostrar que la política de embargos reservados ha causado algún perjuicio o daño real, más allá de herir el orgullo de los periodistas excluidos? Lo que cabe exigir de un medio como *Sientific American* es un esfuerzo coordinado para apoyar a las instituciones científicas y académicas, no para demonizarlas. También esperamos una información basada en hechos y pruebas, no especulaciones y teorías de la conspiración que deterioran la confianza de la opinión pública en la actividad académica.

Darcy Cordell

«¿Puede el autor demostrar que la política de embargos reservados ha causado algún perjuicio o daño real, más allá de herir el orgullo de los periodistas excluidos?»

No puedo imaginar una situación más preocupante que el amordazamiento del periodismo científico que relata el artículo de Charles Seife. La política de embargos reservados no debería tener cabida en la academia ni en las instituciones científicas gubernamentales.

Thomas J. Martin
Woodbridge, Virginia

Responde Seife: *La afirmación de que* Scientific American *debería hacer «un esfuerzo coordinado para apoyar a las instituciones científicas y académicas, no para demonizarlas» hace explícita una discrepancia ya existente entre las diferentes maneras de entender el papel que debería desempeñar la prensa a la hora de informar sobre ciencia. El argumento implícito, y ampliamente respaldado por uno de los lados, es que la función primordial del periodismo científico consiste en promocionar el punto de vista de las grandes instituciones científicas, ya que así se informa mejor a la ciudadanía y se combate la pseudociencia.*

Eso da cuenta de una buena parte de lo que hacemos, pero no constituye nuestro único cometido. De los periodistas también se espera que seamos críticos con las autoridades, con independencia de si en líneas generales aprobamos sus actuaciones o no. No es especulativo ni conspiranoico decir que incluso las mejores instituciones científicas funcionan en un entorno político. Y, cuando compiten por financiación o influencia, sus fines pueden no coincidir con lo que resulte mejor para la población o para la ciencia: esa es la fría realidad de lo que ocurre cuando la ciencia se topa con la ambición humana. Los periodistas no haríamos ningún servicio a nuestros lectores si renunciásemos a vigilar instituciones que influyen en nuestras vidas y que consumen recursos nacionales.

El grado en que los embargos obstaculizan esa segunda función del periodismo científico constituye un tema de debate abierto, incluso entre quienes ejercemos la profesión. Pero, como demuestra mi artículo, los embargos reservados condicionan la cobertura hasta el punto de que nos impiden contactar con voces independientes —y necesarias— antes de publicar una noticia. Si no se nos garantiza una libertad total a la hora de ejercer nuestra función crítica, los periodistas corremos el riesgo de convertirnos en poco más que glorificados expertos en relaciones públicas. Confío sinceramente en que eso no sea lo que la gran mayoría del público espera o desea de medios como Scientific American.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.





EL ANÁLISIS GENÉTICO indica que la especie humana ha poblado ininterrumpidamente la meseta tibetana desde la última glaciación. Algunos pueblos nómadas de la región (*inserto*) aún practican su modo de vida tradicional.

EVOLUCIÓN

Tibetanos de la edad de hielo

Nuevos estudios sobre la migración y la capacidad de resistencia humanas indican que la gélida meseta tibetana fue poblada mucho antes de lo supuesto

Los primeros humanos que se aventuraron en el altiplano del Tíbet, el «techo del mundo», tuvieron que soportar uno de los entornos más inhóspitos que haya conocido nuestra especie. Con una altitud media de más de 4500 metros, en ese enclave frío y árido se dispone de la mitad de oxígeno respirable que a nivel del mar. Desde hace años, se suponía que nadie había puesto el pie en él hasta hace unos 15.000 años, pero nuevos datos genéticos y arqueológicos apuntan a que ese hecho pudo acaecer mucho antes, posiblemente hace unos 62.000, durante la última glaciación. Conocer mejor la historia de la migración y del crecimiento demográfico en la región podría ayudar a desvelar el misterio que envuelve el origen del pueblo tibetano y aportar pistas sobre la adaptación del cuerpo humano a la atmósfera enrarecida que impera en las grandes alturas.

Los autores de un estudio recién publicado en *American Journal of Human Genetics* han esclarecido en parte la historia del poblamiento de la meseta al secuenciar el genoma entero de 38 tibetanos autóctonos y comparar los resultados con las secuencias genómicas de otras etnias. «Los datos han revelado un complejo mosaico de migraciones prehistóricas», explica Shuhua Xu, genetista de poblaciones de los Institutos de Ciencias Biológicas de Shangái, de la Academia China de Ciencias. «La antigüedad de las secuencias tibetanas ha supuesto una gran sorpresa», confiesa. «Pueden atribuirse a ancestros de hace entre 38.000 y 62.000 años, que probablemente representan los primeros colonizadores del altiplano.»

A medida que la glaciación se intensificaba tras esa primera migración, el mestizaje entre los tibetanos y los foráneos quedó en suspen-

so por espacio de miles de años, de lo que se deduce que el desplazamiento hacia la región se redujo a mínimos. «Las vías migratorias debieron de quedar interrumpidas por lenguas de hielo y el ambiente resultó demasiado riguroso hasta para los cazadores y recolectores más tenaces», afirma Xu. Pero hace entre 9000 y 15.000 años (tras el llamado Último Máximo Glacial, período de la última glaciación en el que el hielo alcanzó su extensión máxima), miles de individuos irrumpieron en masa en el Tíbet. «Es la ola migratoria más notable que ha modelado el acervo génico del Tíbet moderno», aclara Xu. Ello concuerda con varias líneas de investigación independientes que señalan que los tibetanos comenzaron a adquirir mutaciones genéticas que los protegieron contra la hipoxia (escasez de oxígeno), hace entre 8000 y 12.800 años.

El equipo de Xu ha sido el primero en secuenciar entero el genoma tibetano con una resolución realmente impresionante, asegura el arqueólogo Mark Aldenderfer, de la Universidad de California en Merced, ajeno a la investigación. Añade que el estudio aporta detalles precisos de cómo distintos colectivos de procedencias diversas mezclaron sus genes para crear el pueblo que hoy llamamos tibetano. Los datos revelan que el 94 por ciento de su dotación genética actual proviene de humanos modernos —posiblemente de aquellos que se adentraron en el Tíbet en la segunda ola migratoria—, y la parte restante, de homininos extintos. La fracción moderna del genoma tibetano refleja una herencia mixta, puesto que guarda una similitud del 82 por ciento con los oriundos del este de Asia, del 11 por ciento con los pobladores del centro del continente y del 6 por ciento con los del sur.

Además, el equipo de Xu ha descubierto un segmento de ADN propio de los tibetanos que conserva una estrecha homología con el genoma del hombre de Ust'-Ishim (representante de los humanos modernos que poblaron Siberia hace 45.000 años) y de varias especies humanas extintas, entre ellas los neandertales, los denisovanos y otros grupos desconocidos. El segmento contiene ocho genes, uno de los cuales resulta esencial para la adaptación a las alturas. Xu sospecha que un híbrido de todas esas especies podría haber sido el ancestro común de los pobladores de la meseta antes del Último Máximo Glacial.

El estudio revela, asimismo, una asombrosa continuidad genética desde la llegada al altiplano de los primeros colonizadores. «Ello indica que el Tíbet ha permanecido habitado siempre, incluso en las épocas de clima más adverso», aclara Xu. Esta idea contradice la opinión generalizada de que los primitivos moradores de la meseta habrían sido aniquilados durante los períodos de mayor rigor, como el Último Máximo Glacial, asegura David Zhang, geógrafo de la Universidad de Hong Kong, que no ha participado en el trabajo de Xu. Aldenderfer y otros sostienen que algunos rincones del altiplano sirvieron como refugios que ayudaron a sobrevivir a la glaciación. «Hubo muchos lugares donde las condiciones no fueron tan hostiles para vivir, como los grandes valles fluviales que atraviesan el altiplano.»

En favor de la antigüedad del poblamiento del Tíbet, viene a sumarse un estudio presentado en el 33º Congreso Internacional de Geografía, celebrado el pasado verano en Pekín, donde un equipo dio a conocer los vestigios arqueológicos más antiguos de la presencia humana en la meseta, datados en entre 31.000 y 39.000 años. El yacimiento, rico en útiles líticos y restos animales, está emplazado a orillas del río Salween, en el sudeste de la meseta tibetana.

Diversas líneas de investigación señalan, pues, que el poblamiento del Tíbet es mucho más antiguo y persistente de lo que se pensaba, asegura Aldenderfer. Pero también subraya que faltan datos para confirmarlo: «Serán precisas más excavaciones para llenar las lagunas».

—Jane Qiu

SALUD

Evitad la humedad, alérgicos

A los ácaros del polvo no les gustan las regiones áridas

Poner tierra de por medio ante ciertas alergias frente a malas hierbas o árboles y mudarse a otra ciudad o región es una alternativa posible, y lo mismo se podrá decir a partir de ahora de las alergias causadas por los ácaros del polvo. Los arácnidos microscópicos —que dejan tras de sí las heces y los cuerpos muertos que desencadenan crisis alérgicas y de asma— no abundan en extensas franjas de las Grandes Llanuras y las Montañas Rocosas, según un nuevo estudio de los artrópodos que habitan en los hogares.

Con la ayuda de ciudadanos interesados, investigadores de la Universidad estatal de Carolina del Norte y de la Universidad de Colorado en Boulder analizaron el ADN de los artrópodos hallados en 732 muestras de polvo tomadas en los marcos de las puertas interiores de domicilios de todos los EE.UU. Entre los datos referentes a muchas especies, han hallado que el este del país y su costa occidental son un verdadero vergel para los ácaros, mientras que los estados interiores del oeste son, en comparación, un desierto. ¿Por qué? Porque estos organismos precisan de una humedad elevada para vivir. (No pueden beber, por lo que absorben la humedad del aire para permanecer hidratados.)

Anne Madden, autora principal del estudio, advierte que el resultado negativo en las muestras procedentes de partes del oeste estadounidense no significa que en tales zonas no existan ácaros. Hasta en las regiones áridas, los colchones y las alfombras, además del mobiliario procedente de zonas más húmedas, pueden albergar colonias de estos animalillos, asegura David Miller, que estudia el vínculo entre los problemas domésticos de humedad y la salud en la Universidad Carleton de Ottawa, que no ha participado en el estudio.



Se calcula que 20 millones de estadounidenses padecen alergia por culpa de ellos. Miller aclara que si uno es alérgico a los ácaros del polvo, vivir en las tierras áridas de Estados Unidos y Canadá y en zonas elevadas es sin duda un buen remedio. Pero no es preciso que se mude al otro extremo del país para escapar: conseguirá desterrarlos si coloca fundas hipoalergénicas en los colchones y las almohadas, lava las sábanas una vez a la semana y pasa a menudo la aspiradora, provista, eso sí, con un filtro de alta eficacia (HEPA).

—Jennifer Frazer

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES (*montañas*); EDWINA DEACON, GETTY IMAGES (*pareja tibetana*); BOB SACHA, GETTY IMAGES (*ácaro*)

MEDIOAMBIENTE

Ecologismo progresista, ecologismo conservador

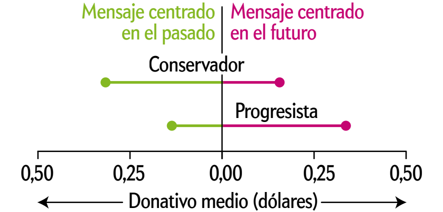
¿Habría más gente preocupada por el entorno si la conservación de la naturaleza se enfocase hacia el pasado?

Las personas de ideología conservadora se muestran más receptivas al ecologismo tras ver mensajes sobre el cambio climático basados en la nostalgia, según un estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad de las personas hacia la conservación del entorno en función de cómo se les presentase el problema, dos investigadores de la Universidad de Colonia llevaron a cabo varios experimentos con individuos que se definían a sí mismos como progresistas o como conservadores. En uno de ellos los participantes recibieron 50 céntimos de dólar que debían repartir entre dos organizaciones ficticias dedicadas a la lucha contra el cambio climático: una que insistía en que había que prevenir la degradación futura del planeta, y otra que ponía el énfasis en la restauración de una Tierra pasada y más sana. En todas las pruebas, los conservadores se mostraron más dispuestos a abrazar el ecologismo cuando el mensaje hacía hincapié en el pasado; en particular, donaron más a la organización que enfocaba el asunto de dicha manera.

Matthew Baldwin, coautor del artículo, atribuye el resultado al valor intrínseco que el conservadurismo otorga al pasado. Según él, estos experimentos demuestran el poder que tiene la contextualización a la hora de perfilar cómo reaccionan las personas ante la información que reciben.

Selección natural



Los participantes debían repartir 50 céntimos de dólar entre dos organizaciones benéficas ficticias: una centrada en recuperar el estado pasado del planeta, y otra que defendía trabajar por la Tierra futura. Mientras que los conservadores se decantaron preferentemente por la primera opción, los progresistas lo hicieron por la segunda.

Otros expertos ponen en duda que el hallazgo vaya a materializarse en cambios de actitud. Riley Dunlap, sociólogo ambiental de la Universidad estatal de Oklahoma, reconoce que el estudio está bien diseñado, pero no cree que modificar el contexto de los mensajes sobre el cambio climático vaya a influir en las personas de tendencia conservadora, sobre todo teniendo en cuenta el alto grado de polarización de la sociedad actual: «Hoy un buen conservador ha de ser escéptico sobre el cambio climático. El calentamiento global se ha unido a Dios, las armas, la homosexualidad, el aborto y los impuestos. Es una parte más de esa ideología».

Con todo, Baldwin cree que abordar el cambio climático como un problema de mercadotecnia en vez de como un asunto político puede ser clave para salir del atolladero: «Si quieres vender un producto, has de pensar en quién es tu público y promocionarlo en función de esa audiencia. [Mis colaboradores y yo] no creemos que la ciencia sea tan diferente».

—Catherine Caruso

TECNOLOGÍA

Herramientas metálicas diminutas

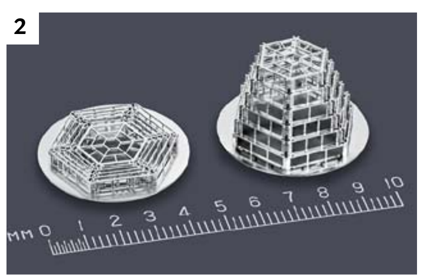
Un nuevo método de impresión en 3D inspirado en la industria de los semiconductores logra nuevos récords de miniaturización

En la carrera hacia la miniaturización de todo tipo de objetos, desde aparatos electrónicos hasta dispositivos médicos, los fabricantes se topan una y otra vez con el problema de los detalles: ¿cómo fabricar componentes a escala casi microscópica pero conservando sus rasgos más finos? Microfabrica, una compañía californiana, ha concebido un proceso que combina la impresión en 3D, donde las estructuras se van formando capa a capa, con las técnicas empleadas en la industria de los microchips, basadas en galvanizar una superficie con iones metálicos. La nueva técnica crea objetos a partir de capas metálicas de 5 micrómetros de espesor, lo que permite obtener estructuras extraordinariamente finas. (En comparación, las capas de las impresoras 3D PolyJet, que rocían plásticos a través de unas boquillas, alcanzan un grosor mínimo de 16 micrómetros.)

La técnica de Microfabrica abre la puerta a crear nuevas herramientas y a miniaturizar aún más las viejas. Por iniciativa de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para la Defensa (DARPA), la compañía ha desarrollado un diminuto refrigerador para microcircuitos, así como un mecanismo temporizador para usarlo en municiones. También elaboran instrumentos quirúrgicos, como fórceps para biopsias de menos de un milímetro de diámetro, o «armazones» para tejidos cuyas uniones les permiten expandirse al paso del crecimiento celular. Carol Livermore, profesora de ingeniería mecánica e industrial de la Universidad Nororiental, en EE.UU., alaba el potencial de la compañía: «No me consta que haya ninguna impresora 3D de altas prestaciones que supere lo que hacen».

—Michael Belfiore





FÓRCEPS para biopsias (*1*) y armazón expandible para tejidos (*2*).

Erratum corrige

En la edición impresa del artículo **Eliminación de contaminantes emergentes de las aguas residuales** [por Silvia Álvarez-Torrellas, Gabriel Ovejero y Juan García Rodríguez; Investigación y Ciencia, febrero de 2017], se omitió por error el apartado final de bibliografía. Esta ha sido incluida en la edición digital del artículo (pdf), que puede descargarse gratuitamente en www.investigacionyciencia.es.

AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*); FUENTE: «PAST-FOCUSED ENVIRONMENTAL COMPARISONS PROMOTE PROENVIRONMENTAL OUTCOMES FOR CONSERVATIVES», MATTHEW BALDWIN Y JORIS LAMMERS EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 113, N.º 52; 27 DE DICIEMBRE DE 2016; CORTESÍA DE MICROFABRICA (*dispositivos metálicos*)



LA MORFOLOGÍA CORPORAL de los pulpos se diversificó mucho antes de lo que se pensaba.

PALEONTOLOGÍA

Un fósil de pulpo, una joya del Jurásico

Los paleontólogos ofrecen una nueva imagen de un cefalópodo primorosamente conservado

Los fósiles bien conservados de cefalópodos no abundan. Si bien las conchas de los amonites, los rostros de los belemnites y otros vestigios de las partes duras del cuerpo se cuentan entre los elementos más abundantes del registro fósil, los paleontólogos raramente consiguen observar la inconfundible anatomía blanda de estos nadadores tentaculados. Los especímenes son tan raros que uno descubierto en 1982 sigue siendo extraordinario: los restos fosilizados de un pulpo de 165 millones de años hallados en Francia.

J. C. Fischer y B. Riou nombraron a este invertebrado de ocho brazos *Proteroctopus ribeti* y describieron sus ventosas para deleite de otros paleontólogos. Pero, a pesar de su inédito grado de detalle, el fósil parece desinflado, conservado como una versión estrujada de su antiguo ser. Ello dificultaba deducir las particularidades de la anatomía y su parentesco con otros pulpos. Han transcurrido más de tres décadas y ahora la paleontóloga Isabelle Kruta, de la Universidad Pierre y Marie Curie de París, y sus colaboradores han ofrecido más detalles sobre el aspecto en vida de este emblemático cefalópodo: su equipo lo reconstruyó en tres dimensiones valiéndose de la microtomografía en sincrotrón, una técnica de imagen de alta definición.

Reinflado y restaurado, *Proteroctopus* pertenece casi con certeza a un importante grupo de octópodos llamado *Vampyropoda*, del que forman parte tanto el pulpo común como el calamar vampiro. Con las nuevas imágenes, los investigadores comprobaron que *Proteroctopus* se asemeja a las actuales formas abisales de *Vampyropoda*, con ciertas salvedades. Por ejemplo, el espécimen del Jurásico posee ocho tentáculos y una aleta sobresaliente a cada lado del cuerpo. Carece de saco de tinta, como el moderno *Vampyroteuthis*, pero sus ventosas están dispuestas en posición oblicua unas respecto a otras, y no en paralelo, como en muchos pulpos actuales. El estudio vio la luz el pasado otoño en *Palaeontology*.

Lo que *Proteroctopus* pueda contarnos de los pulpos ancestrales dependerá del hallazgo de nuevos fósiles, pero este espécimen refuerza la idea, cada vez más aceptada, de que la morfología corporal de estos cefalópodos ya estaba ampliamente diversificada hace unos 164 millones de años. «[Características] que se creían bastante recientes en la evolución del grupo, como la forma de ciertas ventosas, ya existían en el Jurásico», explica Kruta. Los paleontólogos seguramente darían cualquier cosa por saber qué más les depara el registro fósil.

—Brian Switek

DE: «*PROTEROCTOPUS RIBETI IN COLEOID EVOLUTION*», POR ISABELLE KRUTA ET AL., EN *PALAEONTOLOGY*, VOL. 59, NOVIEMBRE DE 2016

ETOLOGÍA

Cómo ahuyentar a un elefante

Se pretende sacar partido de los temores del paquidermo para paliar su confrontación con el hombre



Los elefantes no huyen en desbandada ante un ratón, pero sí hay un insecto que eluden a toda costa: las abejas. Tanto, que los conservacionistas han comenzado a aprovechar ese temor para mantenerlos alejados de los campos de cultivo en África, parte de un conflicto que provoca la muerte a cientos de elefantes y personas cada año.

—John R. Platt

El proyecto Elephants and Bees («Elefantes y Abejas»), a cargo de la ONG Save the Elephants («Salvemos los elefantes»), pretende impedir que estos paquidermos devoren y arrasen los cultivos levantando vallados con abejas: cercas metálicas enristradas de colmenas. El proyecto piloto comenzó en Kenia en 2008 y desde entonces se ha extendido a otros seis países del continente. Según un artículo de inminente publicación en *Conservation Biology*, los vallados zumbantes han ahuyentado al 80 por ciento de los elefantes que se han acercado a su perímetro. Estas peculiares barreras también aportan a los lugareños dividendos adicionales en forma de miel, asegura la directora del proyecto Lucy King.

El programa Air Shepherd («Vigilancia del Aire»), de la Fundación Charles A. y Anne Morrow Lindbergh, está simulando el zumbido de las abejas para minimizar el conflicto. El pasado verano los investigadores hicieron volar drones sobre Malawi en busca de cazadores furtivos, y descubrieron que el rumor de los cuadricópteros espantaba a los elefantes. «Zumban como abejas», explica Otto Werdmuller Von Elgg, responsable de operaciones con drones del programa. Además de su iniciativa contra el furtivismo, ahora el programa lanza al aire, casi cada noche, los cuadricópteros sobre los vallados de los cultivos y en los alrededores del Parque Nacional de Liwonde, como repelente para los elefantes. Estos ingenios voladores aún no son legales en todos los países africanos, pero Von Elgg cree que la idea acabará siendo adoptada en más lugares. «Con un solo dron es posible controlar una manada entera de cien ejemplares», asegura.

MEDICINA

Intestino a la carta

El último órgano con todas las funciones obtenido en el laboratorio

Cuando se trata de fabricar un intestino, los primeros centímetros son los más arduos, sobre todo en la placa de Petri. Científicos del Centro Médico del Hospital Infantil de Cincinnati han logrado este hito: hace poco comunicaban en *Nature Medicine* que habían conseguido producir un segmento de intestino, provisto de nervios, músculos y todo lo demás, a partir de una única estirpe de células madre humanas. En el futuro este tejido podría servir para el estudio de las enfermedades, entre otras aplicaciones.

En 2011, investigadores del mismo centro anunciaron que habían logrado cultivar tejido intestinal, pero desprovisto de células nerviosas y, por tanto, incapaz de contraerse y generar el movimiento ondulante que impulsa el alimento a lo largo del colon. Esta vez, el equipo ha cultivado neuronas aparte y después las ha combinado con otro lote de células madre previamente estimuladas para que se convirtieran en músculo y epitelio. Y listo: ya tenemos un segmento de intestino de varios centímetros de largo. «Como en el embrión humano, las neuronas saben adónde ir», asegura Michael Helmrath, cirujano responsable del Programa de Rehabilitación Intestinal del Hospital Infantil de Cincinnati.

Los científicos implantaron después el tejido en el intestino de un ratón vivo para que madurara. Una vez extraído de nuevo para someterlo a pruebas, estimularon el fragmento hecho a medida con una descarga eléctrica. Se contrajo y siguió haciéndolo solo. «Todo parecía funcionar bastante bien», asegura Helmrath. El intestino se suma así a los riñones, a los organoides cerebrales y a otros contados tejidos del cuerpo que pueden fabricarse en el laboratorio.



Helmrath y su colega Jim Wells se proponen ahora obtener tramos más largos plenamente funcionales, esta vez en cerdos. Algún día esperan poder ayudar a personas con problemas digestivos. La obtención de copias del intestino del paciente permitiría observar cómo se manifiesta la enfermedad o incluso trasplantar el tejido. «El intestino es difícil de reproducir *in vitro*. Haber llegado tan lejos en tan poco tiempo me da esperanzas de poder contar a la larga con alguna solución terapéutica», comenta Wells.

—Ryan F. Mandelbaum

THOMAS FUCHS

BAHÍA DE SCHOONER, costa de Punta Reyes, California.



ENERGÍA

Electricidad de mar y de río

Los ecosistemas de agua dulce y salada podrían ofrecer grandes cantidades de energía renovable

Allí donde los ríos se unen con los mares podría haber una gran oportunidad: el gradiente de salinidad que se forma en la frontera entre el agua dulce y la salada almacena una cantidad considerable de energía potencial. De hecho, se calcula que los estuarios podrían cubrir el 40 por ciento de la generación global de electricidad.

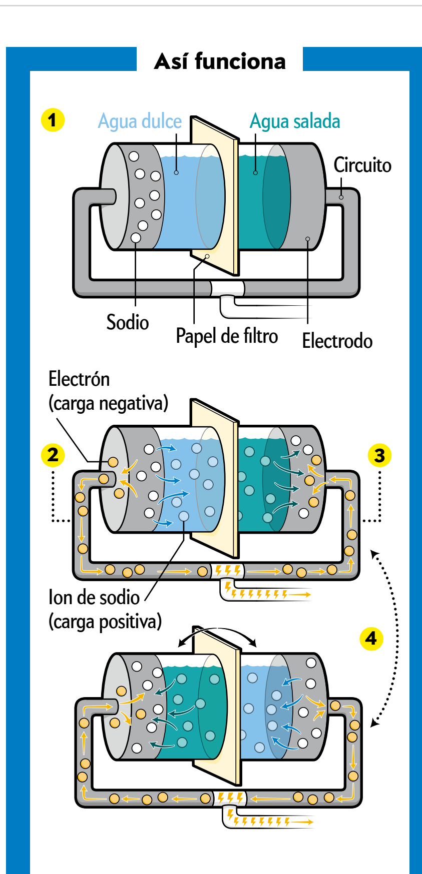
Los expertos llevan años intentando convertir ese potencial en una fuente de energía útil. Una de las últimas propuestas al respecto llega de la Universidad de Pensilvania, donde el profesor de ingeniería civil Chris Gorski y sus colaboradores aseguran haber encontrado una nueva forma de generar electricidad en tales entornos más eficiente y barata que las anteriores. El método, consistente en una variación del proceso conocido como «mezclado capacitivo», recuerda al funcionamiento de una batería, ya que usa electrodos y se basa en la existencia de un gradiente electroquímico. Pero, al contrario que una pila, se trata de un sistema abierto.

Por ahora Gorski y su grupo solo han probado en el laboratorio un prototipo del tamaño de un teléfono móvil. Como explican en *Enviromental Science & Technology*, su dispositivo generó 0,4 vatios por metro cuadrado: dos veces la densidad de potencia lograda en trabajos previos con el método de mezcla capacitiva. Los investigadores aún han de aumentar la producción y determinar si la técnica sería rentable y aplicable a gran escala (una central eléctrica real alcanzaría el tamaño de un pequeño almacén). También deberán investigar los posibles efectos sobre el entorno, ya que esta «batería fluvial» requiere que pasen por ella grandes cantidades de agua de estuario.

Anthony Straub, ingeniero químico y ambiental de Yale, y otros expertos no están convencidos de que sea posible construir un generador eléctrico eficiente en la desembocadura de los ríos, y aseguran que técnicas como la de Gorski solo podrían funcionar con gradientes de sal relativamente acusados, como los existentes en los lagos hipersalados, los pozos geotérmicos o las depuradoras de aguas residuales. No obstante, si el nuevo sistema se demostrase viable y seguro, podría acabar formando parte del abanico de fuentes de energía renovable, como la solar o la eólica.

—*Annie Sneed*

Así funciona



1. Se introduce agua salada y dulce en los lados opuestos de la pila y se sumergen electrodos de ferrocianuro de cobre. Una separación de papel de filtro minimiza la mezcla entre ambos lados.
2. En el lado con agua dulce se ceba el electrodo con sodio. En presencia de agua dulce, el hierro del electrodo reacciona con el sodio y libera iones de este último. El hierro desprende a su vez electrones, los cuales viajan a través de un circuito.
3. En el lado con agua salada, el hierro del electrodo absorbe los iones de sodio y atrae los electrones procedentes del agua dulce. Estas dos reacciones están acopladas; la electricidad se genera cuando los electrones fluyen de un lado a otro de la pila a través del circuito.
4. Cada 60 segundos se intercambian los líquidos (el lado con agua salada pasa a recibir agua dulce, y viceversa), lo que mantiene la corriente.

ROLF SCHULTEN/GETTY IMAGES (*estuario*); BROWN BIRD DESIGN (*ilustración*); FUENTE: «HARVESTING ENERGY FROM SALINITY DIFFERENCES USING BATTERY ELECTRODES IN A CONCENTRATION FLOW CELL», TAEYOUNG KIM ET AL. EN *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, VOL. 50, N.º 17, 6 DE SEPTIEMBRE DE 2016

SALUD PÚBLICA

Diagnóstico de enfermedades de transmisión sexual en minutos

Un centro clínico crea un novedoso y rápido método para los análisis de sífilis, gonorrea, infección por VIH y otros trastornos

Someterse a una prueba de enfermedades de trasmisión sexual (ETS) supone un mal trago para muchos: la cita con el médico, una semana de espera de los resultados y, entre medias, multitud de ocasiones para sentir incomodidad o vergüenza. Tales inconvenientes podrían ser en parte culpables de las crecientes tasas de infección por ETS, razón por la que un centro médico de Londres ha decidido repensar el proceso para adaptarlo a la era digital. Su punto de atención ambulatoria, llamado Dean Street Express, intenta proporcionar una experiencia sin traumas, autónoma y que apenas exige contacto visual con extraños. El sistema funciona gracias a una versión en miniatura de una técnica de análisis molecular.

Una vez concertada la cita a través de Internet, la persona llega al centro médico y confirma su llegada en una pantalla de ordenador. Un técnico le entrega un tubo con los escobillones necesarios para las pruebas, seleccionadas previamente en un menú (el cual abarca todas las enfermedades habituales, como sífilis, gonorrea o clamidia), y, a continuación, accede a una sala privada en la que un vídeo muestra cómo aportar uno mismo las muestras. Seis horas después, los resultados llegan al teléfono móvil.

La tecnología que hace todo esto posible ha sido desarrollada por Cepheid, una empresa estadounidense de diagnóstico que, en 2011, puso a la venta un kit portátil para la tuberculosis capaz de obtener el resultado en 15 minutos. Al igual que las pruebas de laboratorio tradicionales, el método de Cepheid se sirve de marcadores genéticos para diagnosticar de manera fiable la enfermedad, pero todo ocurre en el seno de un pequeño dispositivo portátil. En cinco años, la empresa ha vendido casi 12.000 sistemas de análisis en países que, en ciertos casos, nunca habían visto pruebas moleculares antes. Hoffmann-La Roche, Abbott y otros grandes del sector han ideado desde entonces métodos parecidos.

En Londres, el modelo de Dean Street ha sido tan bien acogido que los fundadores de la empresa han incorporado la prueba del VIH y han abierto un segundo punto de atención. Ya hay previstos cinco más para la capital británica, y Cepheid asegura que también está distribuyendo sistemas de diagnóstico ambulatorio en centros de Barcelona, París, Brisbane, Australia y San Francisco, a los que inminentemente se sumará otro en Florida.

Dave Persing, director médico de la empresa de análisis, lo resume así: «Todo el mundo aprecia las ventajas que supone reducir el tiempo de diagnóstico y facilitar que los pacientes comiencen el tratamiento mucho antes. Eso reduce el contagio, la angustia de la espera y, en general, facilita las cosas. A nadie le gusta recibir la mala noticia de que ha dado positivo en clamidia o gonorrea al cabo de 11 días. Es inadmisible».

—Erin Biba



COLONIAS de la bacteria causante de la gonorrea.

MUSEO DE LA CIENCIA Y DE LA TÉCNICA DE CATALUÑA (*boceto de Leonardo da Vinci*); R. PARULAN JR., GETTY IMAGES (*colonia de bacterias*)

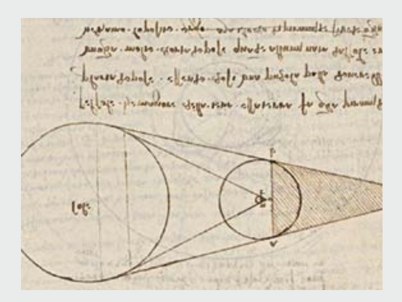
AGENDA

CONFERENCIAS

7 de marzo
Presente y futuro de la humanidad
Rafael Argullol y Ricard Solé
Universidad Pompeu Fabra
Barcelona
https://www.upf.edu > diálogos humanísticos

EXPOSICIONES

Leonardo da Vinci: El genio y los inventos
Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña
Terrassa
http://mnactec.cat/leonardo/exposicio/inici



Antropoceno: La era del cambio global
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es > exposiciones

OTROS

2 y 24 de marzo — Teatro
El aumento
Organiza: Instituto de Ciencias Matemáticas de Madrid
Instituto Francés (2 de marzo)
Universidad Carlos III (24 de marzo)
Madrid
https://www.icmat.es/outreach/el-aumento

14 de marzo — Jornada
Sin π no soy nada
Primera celebración del Día de Pi en España
Real Sociedad Matemática Española y otras organizaciones
Sevilla
http://www.piday.es

31 de marzo — Seminario
Producir o perecer: Ciencia a presión
Asociación Española de Comunicación Científica y Cátedra de Cultura Científica de la Universidad del País Vasco
Bizkaia Aretoa
Bilbao
http://www.aecomunicacioncientifica.org/seminario-ciencia-a-presion-producir-o-perecer

BIOFÍSICA

Un modelo determinista para frenar el crecimiento tumoral

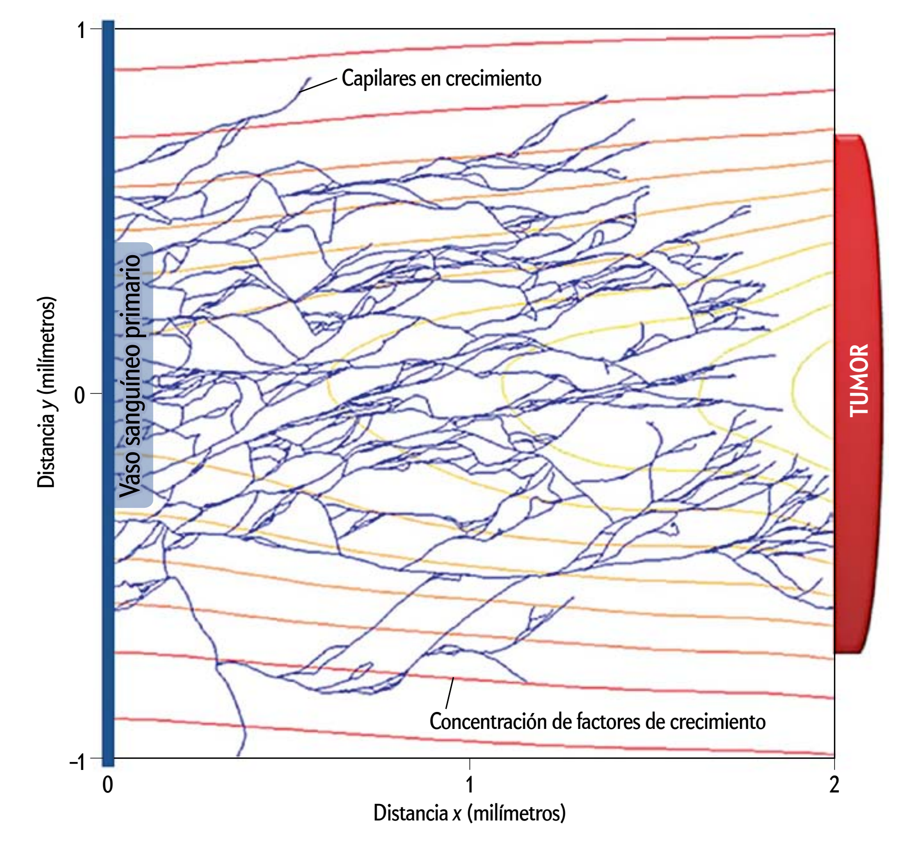
Los tumores atraen los vasos sanguíneos cercanos para conseguir oxígeno y nutrientes. Un modelo matemático logra describir el proceso y abre nuevas posibilidades para diseñar terapias contra el cáncer

LUIS L. BONILLA, MANUEL CARRETERO Y FILIPPO TERRAGNI

La angiogénesis corresponde al proceso de generación y crecimiento de vasos sanguíneos. Se trata de un mecanismo natural que se activa cuando a las células de algún tejido no les llega oxígeno. En tal caso, las células afectadas segregan factores de crecimiento que, al alcanzar un vaso sanguíneo próximo, provocan que sus paredes se abran y se creen nuevos capilares. Los vasos sanguíneos recién formados avanzan guiados por los factores de crecimiento, lo que permite llevar oxígeno y nutrientes a la región que los emitió. Mediante la angiogénesis se reparan las heridas en los tejidos y se regeneran los órganos. Sin embargo, el mismo proceso puede tener también consecuencias negativas, ya que los tumores cancerosos se sirven de él para atraer capilares, alimentarse y crecer.

En 1971, el oncólogo de Harvard Judah Folkman, premio Príncipe de Asturias en 2004, abrió el campo de investigación en angiogénesis al vincularla al crecimiento tumoral y propugnar terapias basadas en su inhibición o estímulo. La angiogénesis es un fenómeno complejo en el que intervienen escalas muy dispares, desde la celular hasta la del tejido, y entender dicha complejidad constituye un elemento clave en la lucha contra el cáncer. En este sentido, los experimentos de laboratorio acompañados de la modelización biofísica, computacional y matemática revisten enorme importancia.

En un trabajo reciente hemos conseguido describir matemáticamente la manera en que avanzan los vasos sanguíneos durante la angiogénesis. Nuestros resultados, publicados en la revista *Scientific Reports*, muestran que las células activas en las puntas de los capilares presentan el comportamiento de un solitón: una «onda solitaria» similar a la que generan los tsunamis. Estas ondas son bien conocidas por físicos y matemáticos desde hace décadas. Su aparición durante la angiogénesis sugiere la posibilidad de diseñar nuevos métodos de control para frenar o retrasar el crecimiento de los vasos y contribuir así al tratamiento de la enfermedad.



CAMINO DEL TUMOR: Un nuevo modelo matemático ha conseguido reproducir la manera en que los tumores atraen los vasos sanguíneos cercanos para conseguir oxígeno y nutrientes. Esta simulación numérica muestra la disposición de los vasos (*azul*) en cierto instante de tiempo; el vaso primario se encuentra en $x = 0$; el tumor, en $x = 2$ mm. Las curvas de nivel indican la concentración de factores de crecimiento emitidos por el tumor (*amarillo, alta*; *rojo, baja*). Al contrario que otros modelos deterministas previos, el usado por los autores incluye la bifurcación espontánea de capilares y su fusión con otros vasos creados con anterioridad.

Modelos estocásticos y deterministas

En la angiogénesis, las células que se encuentran en la punta de un capilar gozan de gran movilidad y no proliferan. El resto sí se reproducen: siguen a las primeras y, de esta manera, van construyendo el nuevo vaso sanguíneo.

A la hora de modelizar el proceso, las puntas de los vasos se tratan como partículas en movimiento cuya trayectoria determina la forma del nuevo capilar. La tendencia del vaso a dirigirse hacia el tumor, donde hay mayor concentración de factores de crecimiento, se trata como una fuerza. Los factores de crecimiento se difunden por el tejido y los capilares los consumen conforme avanzan hacia el tumor. Otros mecanismos que influ-

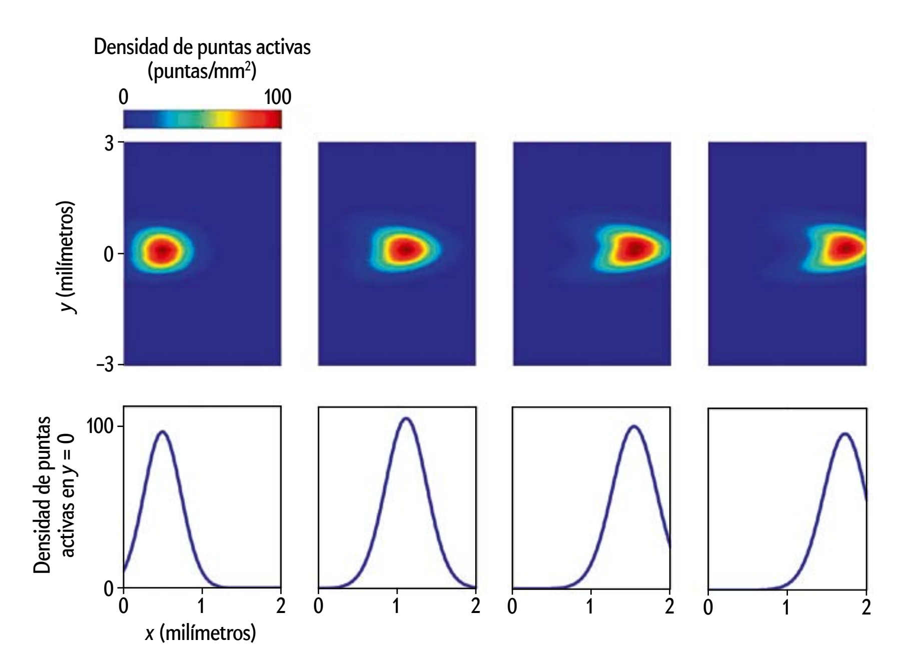
yen en los vasos sanguíneos se pueden incluir como nuevas fuerzas de distinto tipo (aleatorias, dependientes del tejido exterior a los vasos, etcétera).

Hay dos peculiaridades más de la dinámica que deben incluirse en estos modelos. Por razones todavía poco claras, las puntas se bifurcan ocasionalmente y se crean más puntas móviles, una nueva por cada bifurcación. Además, cuando una punta activa se encuentra con un vaso sanguíneo creado con anterioridad, se funde con él. Este proceso, conocido como anastomosis, favorece la circulación sanguínea por los capilares. Tras la anastomosis, la punta se desactiva.

La bifurcación de vasos se considera que ocurre de manera aleatoria, con una probabilidad dada por lo que observamos en los experimentos. Por su parte, la anastomosis aparece como una consecuencia de la dinámica de los capilares. Esta modelización en términos de partículas sujetas a fuerzas aleatorias, bifurcaciones y anastomosis se denomina «descripción estocástica» de la angiogénesis. Los primeros modelos estocásticos datan de los años noventa; fueron resueltos numéricamente y sus resultados se validaron con los de los experimentos. Sin embargo, aunque dichos modelos revelaron varios aspectos importantes del proceso, no se prestaban a analizar la matemática subyacente.

Una excepción la hallamos en los trabajos de Vincenzo Capasso y sus colaboradores de la Universidad de Milán. En 2009 y durante los años posteriores, estos investigadores intentaron hallar una descripción determinista para la densidad de puntas activas; sin embargo, no lo consiguieron, debido a la dificultad que suponía incorporar la anastomosis en dichos modelos.

El problema físico pionero en el que se descubrieron dos descripciones equivalentes, una estocástica y otra determinista, fue el movimiento browniano, la agitación de las partículas de polen suspendidas en agua observada en 1827 por el botánico inglés Robert Brown. En la descripción estocástica, propuesta por Paul Langevin en 1906, las partículas efectúan movimientos erráticos debido a fuerzas aleatorias causadas por las colisiones de las moléculas de agua. En la determinista, formulada por Einstein en 1905, la evolución en la densidad de partículas brownianas viene dada por una ecuación de difusión.



SOLITONES: El nuevo modelo ha permitido demostrar que las puntas de los capilares forman un solitón, una estructura matemática bien conocida, similar en este caso a algunas ondas que se propagan por el agua. Estas imágenes muestran la evolución en la densidad de puntas activas en distintos instantes de tiempo (*arriba*) y el perfil de la densidad en $y = 0$ en cada momento (*abajo*). Dicho perfil resulta ser similar al solitón de Korteweg-de Vries, un tipo de onda estable estudiada en los años sesenta del siglo pasado.

Ondas solitarias

Nuestras investigaciones sobre la angiogénesis comenzaron en 2013, durante una estancia de Capasso en la Universidad Carlos III de Madrid. En colaboración con él, encontramos, por primera vez en este campo, una descripción determinista para la densidad de puntas activas. Como aspecto clave, aquel modelo incorporaba la anastomosis y podía recuperarse promediando la descripción estocástica. En él puede verse que la densidad de puntas activas progresa formando una sola onda que, con pequeños cambios de forma y velocidad, avanza hacia el tumor.

La ventaja de una descripción determinista es que permite ir más lejos en el análisis de los fenómenos. En el trabajo publicado en *Scientific Reports*, efectuado junto con Bjorn Birnir, de la Universidad de California en Santa Bárbara, hemos encontrado una solución similar al solitón de Korteweg-de Vries, un tipo de onda que se propaga por el agua. Su estudio matemático se remonta al trabajo que en 1967 llevaron a cabo los investigadores de la Universidad de Princeton Clifford Gardner, John Greene, Martin Kruskal y Robert Miura, y, en 1968, Peter Lax, de la Universidad de Nueva York, y puede considerarse uno de los mayores logros de la matemática del siglo XX.

Un experimento sencillo que permite visualizar estas ondas consiste en parar de repente la corriente de agua que fluye por una acequia pequeña y poco profunda dejando caer en ella un ladrillo. En tal caso, veremos que aparece una elevación que se propaga y que mantiene su forma inalterada durante un tiempo y una distancia considerables. Estas ondas estables revisten interesantes propiedades matemáticas: las ondas altas avanzan a mayor velocidad que las bajas, y, cuando una onda alta alcanza a otra de menor tamaño, al cabo de un tiempo la sobrepasa y ambas recuperan su forma y velocidades previas.

Tales propiedades aún están pendientes de estudio en nuestro «solitón angiogénico». No obstante, lo que sí hemos encontrado es que sus coordenadas colectivas (aquellas que dan cuenta de su velocidad y forma) quedan descritas por una serie de ecuaciones diferenciales cuya solución permite reconstruir el solitón y, por ende, nos da una idea de la red de vasos sanguíneos que se va formando detrás. Las ecuaciones diferenciales de las coordenadas colectivas contienen la

información esencial sobre las fuerzas que actúan sobre las puntas activas de los vasos, su multiplicación y anastomosis, y resultan mucho más sencillas de analizar que las descripciones completas del proceso, sean estocásticas o deterministas. Sabemos que nuestro solitón describe el proceso real de angiogénesis porque deriva de modelos anteriores validados por los experimentos. Dichos modelos, sin embargo, no permitían estudiar las propiedades matemáticas subyacentes. Ahora, gracias a este hallazgo podremos entender mucho mejor los resultados de las simulaciones numéricas.

Identificar un solitón como el motor de la angiogénesis sugiere la posibilidad de controlar este complejo proceso a través del análisis de sus coordenadas colectivas. Así pues, nuestro resultado constituye un primer paso para, a partir de modelos teóricos, entender y controlar la angiogénesis inducida por tumores. Por ejemplo, permitiría estudiar el efecto de los fármacos antiangiogénicos y analizar su eficacia a partir de su influencia en las coordenadas colectivas del solitón. En este sentido, creemos que el estudio de la angiogénesis a partir de la evolución del solitón cuenta con el potencial de ejercer un gran impacto en las aplicaciones médicas actuales y futuras.

—Luis L. Bonilla
—Manuel Carretero
—Filippo Terragni
Instituto Gregorio Millán Barbany
Universidad Carlos III de Madrid

PARA SABER MÁS

Hybrid modeling of tumor-induced angiogenesis. Luis L. Bonilla et al. en *Physical Review E*, vol. 90, art. 062716, diciembre de 2014.
Stochastic model of tumor-induced angiogenesis: Ensemble averages and deterministic equations. Filippo Terragni et al. en *Physical Review E*, vol. 93, art. 022413, febrero de 2016.
Soliton driven angiogenesis. Luis L. Bonilla et al. en *Scientific Reports*, vol. 6, art. 31296, agosto de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Angiogénesis terapéutica. Rakesh K. Jain y Peter F. Carmeliet en *IyC*, febrero de 2002.
Modelización en biología a través de escalas múltiples. Santiago Schnell, Ramón Grima y Philip K. Maini en *IyC*, mayo de 2007.
Una forma indirecta de domar el cáncer. Rakesh K. Jain en *IyC*, abril de 2014.

GEOLOGÍA

Indicios de vida en las rocas más antiguas de la Tierra

Nuevos resultados sugieren que la vida en nuestro planeta pudo haber comenzado mucho antes de lo que se pensaba

ABIGAIL C. ALLWOOD

¿Surgió la vida en la Tierra tras un período relativamente largo de evolución planetaria o apareció poco después del nacimiento de nuestro mundo? La respuesta podría hallarse en un trabajo publicado el año pasado en *Nature* por Allen P. Nutman, de la Universidad de Wollongong, y otros investigadores.

Los autores analizaron varias rocas de 3700 millones de años de antigüedad pertenecientes al cinturón de rocas verdes de Isua, en Groenlandia. No es allí donde los paleobiólogos esperarían encontrar rastros de vida, pues no se trata de rocas de origen sedimentario —como las que albergan la mayor parte del registro fósil—, sino metamórficas; es decir, rocas intensamente deformadas por el calor y la presión durante su enterramiento profundo. Sin embargo, Nutman y sus colaboradores encontraron una rareza: en un pequeño afloramiento que había quedado al descubierto por la fusión de la nieve, hallaron rocas que habían sobrevivido al paso del tiempo geológico conservando intactos algunos de sus rasgos sedimentarios primigenios.

En esa diminuta ventana hacia el pasado hay sutiles indicios que sugieren un antiguo entorno superficial sorprendentemente parecido a los que sabemos aptos para la vida. Las rocas muestran rizaduras y apilamientos de fragmentos rocosos depositados durante antiguas tormentas. Si a ello sumamos una química mineral propia del agua de mar, todo apunta hacia un ambiente marino poco profundo de precipitación de carbonatos, similar a los que han albergado una abundante biota a lo largo de la historia de la Tierra.

Pero, además, en las rocas se observan estructuras que recuerdan a estromatolitos: formaciones laminadas originadas a partir de una acreción de sedimentos derivada de la acción microbiana. El hallazgo de estromatolitos en semejante contexto no tendría nada de sorprendente si las rocas fuesen 500 millones de años más jóvenes. Los estromatolitos fósiles son bien conocidos por quienes estudian rocas con edades comprendidas entre los 3500 y los 500 millones de años, un extenso período en el que la biosfera de nuestro planeta fue casi exclusivamente microbiana. Los actuales se localizan en una variedad de entornos, como zonas marinas someras, fuentes hidrotermales y ambientes lacustres, entre los que se incluyen los lagos cubiertos de hielo de la Antártida.

El problema reside en que las estructuras con aspecto de estromatolito pueden también formarse sin la mediación de organismos vivos, lo que dificulta de manera considerable su interpretación. Además, cuanto más vetusta es una roca, menos estromatolitos muestra y peor se conservan estos, lo que complica el análisis.

¿Origen microbiano?

Hoy por hoy, los indicios de vida considerados más arcaicos se encuentran en rocas sedimentarias de 3500 millones de años de antigüedad halladas en el oeste de Australia. Parecía improbable remontarse aún más en el tiempo, ya que casi no se conservan rocas pertenecientes a los primeros estadios de la historia de nuestro planeta, y las que se conocen son de tipo metamórfico, como las de Isua: diminutos y torturados vestigios de la infancia de la Tierra.

Aunque encontrar pruebas de vida en tales rocas pueda parecer imposible, los científicos han estado intentándolo durante años. Hasta ahora se habían obtenido posibles huellas químicas de vida que, si bien resultaban seductoras, eran también controvertidas. No cabe duda de que el



¿VIDA ANCESTRAL? Un trabajo reciente ha hallado posibles indicios de vida microbiana en rocas de 3700 millones de años de antigüedad. Las muestras obtenidas (*imagen*) presentan estructuras cónicas similares a estromatolitos (*líneas punteadas*), formaciones sedimentarias causadas por la acción de microorganismos.

ALLEN NUTMAN

descubrimiento de Nutman y sus colaboradores también suscitará debate. Con todo, su relevancia radica en que constituye un tipo de bioindicador completamente nuevo: uno que añade datos morfológicos y texturales al conjunto de pistas químicas observadas en las rocas ancestrales.

Los argumentos para atribuir un origen biológico a las estructuras halladas en Groenlandia se limitan a la información disponible en el minúsculo afloramiento. Hay muy pocas muestras aptas para el estudio, y aunque la morfología general de las estructuras de Isua se ha mantenido, los detalles texturales y químicos se han degradado de manera sustancial. No quedan restos orgánicos o celulares. Pero, a pesar de tales limitaciones, existen importantes indicios de que las formaciones son producto de la actividad microbiana en un ambiente sedimentario.

En primer lugar, las estructuras presentan una morfología cónica y una textura interna finamente laminada. Entre los conos se observan capas sedimentarias que parecen arena apilada contra los lados, lo que apunta a la acumulación de sedimentos granulares en zonas bajas del fondo marino situadas entre formaciones de mayor altura. Tales rasgos morfológicos y texturales revelan que las estructuras no son simples plegamientos rocosos. Además, las concentraciones de titanio y potasio son mayores en dichas estructuras que en las capas situadas entre ellas, lo que apunta a la acumulación local de un tipo de sedimento distinto.

Así pues, tales formaciones constituyen un ejemplo de variación localizada de la sedimentación. En una morfología cónica, ese tipo de contraste en composición y textura suele considerarse una pista razonablemente fiable de actividad microbiana. Por un lado, se habría producido una precipitación mineral por acción de microorganismos; por otro, una sedimentación abiótica de partículas.

De Groenlandia a Marte

En caso de que realmente nos encontrásemos ante la «tumba» de nuestros ancestros más antiguos, las implicaciones serían de primer orden. Hace 3700 millones de años, la Tierra era un lugar convulso, bombardeado por asteroides y que aún se encontraba en sus primeros estadios de formación. Si la vida logró arraigar en tales condiciones y dejar vestigios de su existencia, por más que estos se reduzcan a una minúscula sección de roca metamórfica, querría decir que la vida no es un fenómeno improbable y reacio a comenzar.

Todo lo que sabemos sobre la vida en el universo depende del tiempo que tardase la Tierra en desarrollar unas condiciones planetarias aptas para la aparición de organismos. Puede que ahora Marte se nos antoje un lugar aún más prometedor para haber sustentado vida en el pasado. Un buen número de misiones al planeta rojo han demostrado que, en la época en que se formaron las rocas de Isua, Marte no era muy distinto de la Tierra en lo referente a su habitabilidad; además, su superficie presentaba masas de agua permanentes.

Hace poco, el vehículo explorador *Curiosity*, de la NASA, encontró en Marte rocas que se formaron en agua químicamente benigna, equiparable a la que nutrió la vida en la Tierra primigenia. Sin embargo, aunque aquellas masas de agua fueran habitables, la pregunta clave es: ¿se secaron mucho antes de que los ingredientes necesarios para la vida tuviesen tiempo de engendrar organismos? Puesto que, en términos geológicos, el denominado «bombardeo intenso tardío» del sistema solar había concluido muy poco antes (100 millones de años atrás), ¿contó la vida con tiempo suficiente para emerger e incorporarse al registro fósil? Solo disponemos de un ejemplo para abordar la cuestión. Si las estructuras de Isua son efectivamente de origen microbiano, entonces ese ejemplo nos estaría diciendo que así fue.

—Abigail C. Allwood
Laboratorio de Propulsión a Chorro
Instituto de Tecnología de California

Artículo original publicado en *Nature* vol. 537, págs. 500-501, 2016.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia. Abigail C. Allwood et al. en *Nature*, vol. 441, págs. 714-718, junio de 2006.
A habitable fluvio-lacustrine environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. J. P. Grotzinger et al. en *Science*, vol. 343, art. 1242777, enero de 2014.
Rapid emergence of life shown by discovery of 3700-million-year-old microbial structures. Allen P. Nutman et al. en *Nature*, vol. 537, págs. 535-538, septiembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de la vida. Robert Shapiro en *IyC*, agosto de 2007.
El origen de la vida. James Trefil, Harold J. Morowitz y Eric Smith en *IyC*, septiembre de 2009.
El origen de la vida. Alonso Ricardo y Jack W. Szostak en *IyC*, noviembre de 2009.

MICROBIOLOGÍA

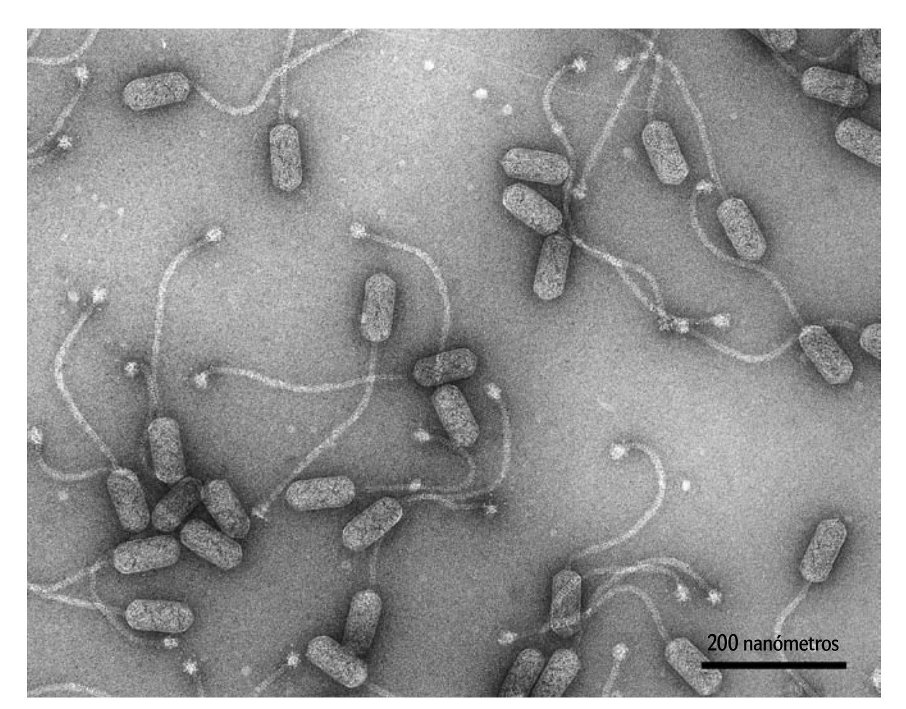
Los bacteriófagos, unos eficaces antimicrobianos

Los tratamientos basados en virus que infectan a bacterias ofrecen una prometedora alternativa a los antibióticos, tanto en el ámbito clínico como en el alimentario

LUCÍA FERNÁNDEZ LLAMAS, DIANA GUTIÉRREZ Y PILAR GARCÍA

La calidad de vida en los países desarrollados se verá seriamente comprometida en un futuro próximo si la comunidad científica no halla respuesta al grave problema de la creciente resistencia de las bacterias patógenas a los antibióticos. En este contexto, varios grupos de investigación están estudiando alternativas antimicrobianas seguras que permitan tratar enfermedades infecciosas o eliminar patógenos asociados a distintas actividades humanas (agricultura, veterinaria, alimentación). La denominada terapia fágica es una de las opciones más factibles. Consiste en utilizar virus que infectan a bacterias, conocidos como bacteriófagos o fagos, así como ciertas proteínas derivadas de ellos, las endolisinas, para destruir bacterias patógenas.

El empleo de bacteriófagos para tratar enfermedades se inició a principios del siglo xx, poco después de su descubrimiento y tras comprobarse que provocaban la muerte de las bacterias al producir su lisis (destrucción de la membrana celular). Sin embargo, el hallazgo de la penicilina por Fleming en 1928 y su exitoso uso durante la Segunda Guerra Mundial impulsaron la identificación de nuevos antibióticos (actinomicina, estreptomicina, neomicina) en la década de los cuarenta. Ello relegó los bacteriófagos a un segundo plano, puesto que los antibióticos poseían un espectro de actividad más amplio. Únicamente los países del este de Europa (especialmente los pertenecientes a la antigua Unión Soviética y Polonia) han seguido utilizando la terapia fágica contra algunas infecciones. Sin embargo, el notable aumento en los últimos años de las bacterias resistentes a los antibióticos está reactivando la terapia fágica, ya que la efectividad de los bacteriófagos y de las endolisinas sobre los patógenos no depende en absoluto de su grado de resistencia a los antibióticos.



LOS BACTERIÓFAGOS philPLA-A72 (*estructuras ovaladas con una cola filiforme*) tienen la capacidad de destruir la bacteria *Staphylococcus aureus*, un patógeno que puede provocar infecciones graves y que es resistente a varios antibióticos. Imagen obtenida mediante microscopía electrónica.

CORTESÍA DE PILAR GARCÍA SUAREZ

Biología de los bacteriófagos

Los bacteriófagos infectan a las bacterias de manera muy específica: cada especie o género bacteriano es atacado por un determinado grupo de bacteriófagos. Sin embargo, resultan inocuos para los humanos, los animales y las plantas.

La estructura de estos virus consta de una cápside proteica con forma icosaédrica cuyo interior alberga el material genético. Poseen una cola, también proteica, que está unida a la cápside a través del cuello y que puede llevar fibras en las que se hallan los receptores para el reconocimiento y unión a la bacteria.

Los bacteriófagos son muy abundantes en el ambiente y pueden hallarse en prácticamente cualquier hábitat donde se desarrolle la bacteria a la que infectan. Tal es así, que se calcula que son las entidades biológicas más prolíficas de la biosfera, con un total de 10^{31} partículas fágicas.

Funcionan como parásitos intracelulares estrictos que dependen de la maquinaria biosintética de la bacteria para desarrollarse. Su ciclo biológico les confiere la capacidad de actuar como agentes bactericidas.

Pero, además, los fagos pueden presentar dos tipos de ciclo: lisogénico o lítico. En el primero, el material genético se inserta en el genoma de la bacteria y permanece en estado latente, por lo que estos fagos no resultan de interés para la terapia fágica. Únicamente se utilizan los que realizan un ciclo lítico. Este último consta de varias etapas. El bacteriófago se adhiere inicialmente a la célula bacteriana y, a continuación, inyecta el material genético en su interior. Una vez en el citoplasma, los genes fágicos se expresan y el genoma se replica para dar lugar a varias copias. Las proteínas estructurales de los nuevos viriones se ensamblan y forman partículas víricas maduras. Finalmente,

ciertas moléculas fágicas provocan la ruptura de la pared bacteriana y se produce la liberación de la progenie vírica.

Las moléculas fágicas en cuestión son las endolisinas. Se trata de unas enzimas que degradan el peptidoglicano, un polímero que forma parte de la pared de la bacteria, y provocan la lisis osmótica de la célula. El particular modo de acción de las endolisinas ha permitido acuñar el término «enzibióticos» para referirse a estas sustancias.

Usos diversos

Desde el punto de vista de su aplicación como antimicrobianos, las endolisinas presentan dos ventajas fundamentales. En primer lugar, su espectro de acción suele incluir a las especies bacterianas de un mismo género, lo que facilita la eliminación selectiva de los microorganismos patógenos, a la vez que se mantiene la viabilidad de aquellos que resultan beneficiosos. La segunda ventaja es que no se han hallado resistencias bacterianas frente a estas proteínas, lo que las diferencia de otros antimicrobianos (antibióticos, desinfectantes, etcétera). Por otra parte, la estructura de las endolisinas las hace atractivas para la ingeniería genética. Pueden crearse así proteínas recombinantes que ejerzan la función de endolisinas pero con propiedades mejoradas o, incluso, utilizar partes de tales proteínas a modo de sensores muy eficaces para detectar las bacterias patógenas de interés.

Entre las numerosas aplicaciones de los antimicrobianos derivados de bacteriófagos, se está investigando su eficacia en distintos campos. En los sectores clínico, veterinario y de la seguridad alimentaria es donde los estudios se hallan más avanzados.

El tratamiento de enfermedades infecciosas en humanos mediante productos fágicos está respaldado por los resultados positivos obtenidos a lo largo de muchos años en los países del este de Europa, los cuales han sido recopilados por el experto Alexander Sulakvelidze, de la empresa Intralytix. En la Unión Europea, cabe señalar los trabajos de Rob Lavigne, de la Universidad Católica de Lovaina, sobre la aplicación de fagos y proteínas fágicas para combatir infecciones. Especialmente relevantes son sus investigaciones sobre el empleo de productos fágicos frente a bacterias como *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* y *Clostridium difficile*, responsables de infecciones graves. Tales productos se hallan en diferentes fases de desarrollo, la mayoría de ellos en las fases 1 y 2 de los ensayos clínicos en humanos. Hasta el momento los resultados obtenidos son muy prometedores y no se están observando efectos secundarios como consecuencia de su aplicación.

Debe recalcarse, en este punto, que la actual normativa europea sobre el uso de nuevos productos terapéuticos es muy restrictiva y pensamos que debería ser modificada para ofrecer la posibilidad de emplear productos fágicos, más teniendo en cuenta el creciente riesgo de salud pública que suponen las bacterias multirresistentes a los antibióticos.

El uso de antimicrobianos derivados de bacteriófagos en veterinaria tiene también un gran interés, ya que permitiría reducir la utilización de los antibióticos clásicos en este sector y, por tanto, la aparición de bacterias resistentes [*véase* «Resistencia antibiótica surgida de las granjas», por Melinda Wenner Moyer; Investigación y Ciencia, febrero de 2017]. También mitigarían la transmisión de bacterias zoonóticas (procedentes de los animales) a la cadena alimentaria, lo que disminuiría el número de brotes debidos al consumo de alimentos contaminados. En este sentido, los productos que se están desarrollando van encaminados a eliminar las bacterias zoonóticas del tubo digestivo de los animales antes de su sacrificio, o bien a mejorar la desinfección de las instalaciones donde se procesa la materia prima. Con los nuevos antimicrobianos pueden combatirse diversas bacterias, entre ellas *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes* y *Clostridium perfringens*. Alguno de estos productos se comercializan actualmente en varios países: EE.UU., Canadá, Nueva Zelanda, Australia, Suiza, Israel, Holanda y Noruega.

La seguridad alimentaria es otro sector donde los antimicrobianos derivados de bacteriófagos presentan un gran potencial. Podrían ser utilizados como bioconservantes que impidiesen el desarrollo de patógenos en los alimentos, y también como desinfectantes para la industria de procesamiento, lo que disminuiría el riesgo de contaminación de los productos durante su elaboración. En los últimos años se han realizado varios trabajos que muestran la utilidad de los fagos para evitar el desarrollo de bacterias como *S. aureus*, *L. monocytogenes*, *Salmonella*, *E. coli* y *Campylobacter jejuni* en diversos alimentos. En concreto, nuestro grupo ha puesto de manifiesto la eficacia de una mezcla de bacteriófagos para mejorar la calidad higiénico-sanitaria del queso. En el campo de la detección de patógenos en alimentos mediante endolisinas destaca el trabajo dirigido por Martin Loessner, de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich.

Con respecto al futuro, cabe destacar el enorme interés que la comunidad científica ha depositado en los bacteriófagos, lo cual se refleja en las numerosas publicaciones sobre el tema y la proliferación en los últimos años de empresas biotecnológicas centradas en su explotación como antimicrobianos. Entre los productos comerciales fágicos pueden citarse Listex P100 y Salmonelex, de Micreos, con aplicación como conservantes cárnicos que impiden el crecimiento de *L. monocytogenes* y *Salmonella*, respectivamente. En cuanto al tratamiento de infecciones cutáneas provocadas por *S. aureus*, se halla disponible el producto Staphefekt, que contiene endolisinas.

Los resultados de los distintos grupos de investigación, junto con la explotación exitosa de un gran número de productos comerciales, permiten vislumbrar el futuro con cierto optimismo, sobre todo por lo que respecta al desarrollo de nuevos antimicrobianos para combatir infecciones en las que los antibióticos han dejado de ser efectivos.

—Lucía Fernández Llamas
—Diana Gutiérrez
—Pilar García
Instituto de Productos Lácteos de Asturias (CSIC)
Villaviciosa, Asturias

PARA SABER MÁS

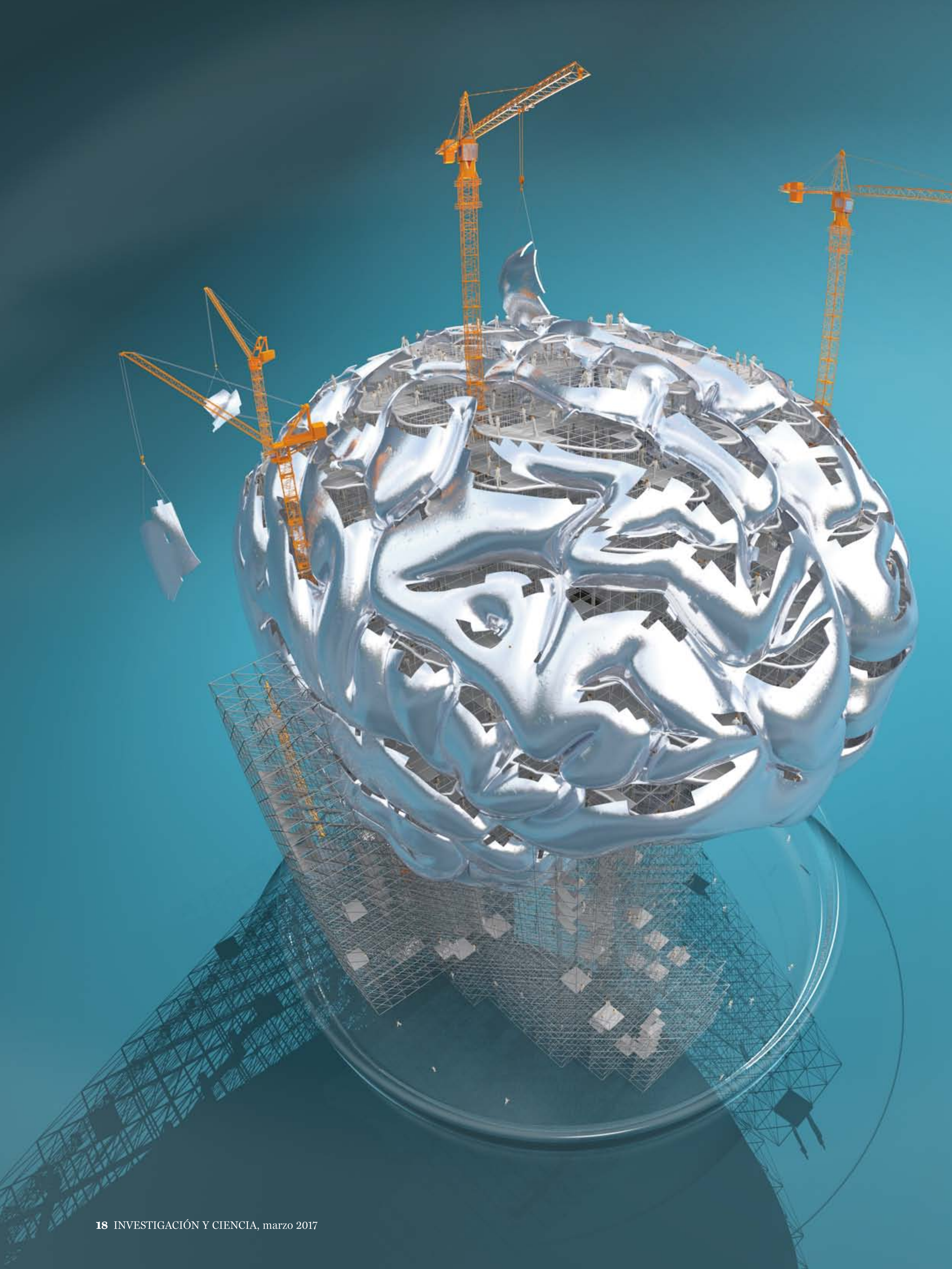
Bacteriophages and their application in food safety. P. García et al. en *Letters in Applied Microbiology*, vol. 47, n.º 6, págs. 479-485, 2008.

Application of bacteriophages for detection of foodborne pathogens. M. Schmelcher y M. J. Loessner en *Bacteriophage*, vol. 4, e28137, 2014.

Bacteriophage therapy: Advances in formulation strategies and human clinical trials. D. Vandenheuvel, R. Lavigne y H. Brüssow en *Annual Review of Virology*, vol. 2, n.º 1, págs. 599-618, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Un siglo de bacteriófagos. Forest Rohwer y Anca M. Segall en *IyC*, abril de 2016.



«Si no lo puedo crear,
no lo entiendo.»
—Richard Feynman, 1988

NEUROCIENCIA

CEREBROS CREADOS EN EL LABORATORIO

Los científicos copian el órgano más complejo de la naturaleza con la esperanza de resolver los misterios de los trastornos mentales, desde el autismo hasta el alzhéimer

Jürgen A. Knoblich

EN SÍNTESIS

Los conocimientos sobre el cerebro humano proceden con frecuencia de experimentos llevados a cabo con ratones, ratas u otros animales. El cerebro de estas especies tiene mucho en común con el humano, pero se halla muy poco plegado, una diferencia que afecta al funcionamiento neural.

Las propiedades únicas del cerebro humano explican en parte por qué los estudios con roedores no han dado lugar a nuevos tratamientos contra diversos trastornos mentales, como el alzhéimer o la esquizofrenia. Ello ha motivado la búsqueda de nuevas formas de llevar a cabo experimentos de neurociencia.

Una alternativa contempla el cultivo de una parte del cerebro en desarrollo en una placa de laboratorio. Es muy probable que estos organoides proporcionen información que no puede obtenerse a partir de estudios realizados con ratones; ya se están usando en investigaciones sobre el virus del Zika.

BRYAN CHRISTIE

Jürgen A. Knoblich es subdirector científico del Instituto de Biotecnología Molecular de la Academia Austríaca de las Ciencias, en Viena. Estudia las células madre neurales y el desarrollo del sistema nervioso de la mosca de la fruta.



TODO LO QUE NOS HACE HUMANOS reside en el interior de los 1,4 kilos de tejido amarillento que componen nuestro cerebro. Es aquí donde se forjan nuestros pensamientos, donde nacen los sentimientos de amor u odio y donde surgen las ideas más creativas o más perversas de la humanidad. Esta estructura con forma de nuez también es el órgano más complejo que ha creado la naturaleza. El cerebro alberga unos ochenta y seis mil millones de neuronas que tienen que formarse en el momento preciso, migrar al lugar correcto y conectarse del modo adecuado, si queremos sobrevivir y prosperar.

Conocer exactamente cómo se desarrolla y funciona el cerebro humano constituye el desafío más grande de la biología moderna. Casi todo lo que hemos aprendido sobre este órgano desde el nacimiento de la neurociencia, hace más de cien años, es el resultado de los experimentos llevados a cabo con animales, a menudo ratones o ratas. Los científicos podían justificar esta estrategia porque los ratones y los humanos poseemos una misma arquitectura cerebral: contamos con numerosos tipos análogos de neuronas y recurrimos a las mismas regiones cerebrales para desarrollar procesos mentales comunes. Pero los humanos y los roedores diferimos en un aspecto crucial. Mientras que el cerebro del ratón tiene una superficie lisa, el nuestro se halla muy plegado.

Para los legos, esa desigualdad podría parecer trivial. Pero los neurobiólogos creen que el plegamiento supone una diferencia enorme para el funcionamiento del cerebro humano. Permite colocar muchas más neuronas dentro de un mismo volumen y, además, constituye una característica distintiva de todos los animales «inteligentes», como los monos, los gatos, los perros y las ballenas. Los biólogos evolutivos han demostrado que el plegamiento surgió a partir de otra diferencia entre los ratones y las personas: en muchas regiones del cerebro las neuronas se originan a partir de un conjunto específico de células precursoras que en los ratones son muy escasas.

Tales diferencias pueden explicar por qué numerosas mutaciones genéticas habituales que en los humanos provocan trastornos neurológicos graves resultan inocuas en los ratones cuando los científicos las introducen en ellos para estudiar los mecanismos de las enfermedades humanas. Si las mutaciones afectan al desarrollo o al mantenimiento de la arquitectura del cerebro humano o a la función de los tipos de células que solo posee nuestra especie, entonces su estudio en ratones estará condenado al fracaso. De hecho, las características únicas de nuestro cerebro tal vez sean una de las causas por las que al investigar con roedores aún no hayamos encontrado la cura para trastornos mentales como la esquizofrenia, la epilepsia o el autismo.

El reconocimiento de las diferencias entre el cerebro de ratón y el humano ha estimulado la búsqueda de formas más informativas de llevar a cabo los experimentos de neurociencia. Recientemente, mi laboratorio ha dado con una estrategia interesante: cultivar en una diminuta placa de laboratorio la región más grande del cerebro en desarrollo. Estas estructuras cerebrales, denominadas organoides, o minicerebros, proporcionan un modelo del cerebro humano que debería aportar información que no puede obtenerse de los experimentos con ratones. En ellos es posible estudiar lo que sucede cuando se los expone, por ejemplo, al virus del Zika, que puede alterar el desarrollo cerebral en los fetos de las mujeres infectadas; o lo que ocurre cuando un organoide se modifica genéticamente para que imite a un cerebro afectado por una enfermedad neurológica de interés.

EL CEREBRO EN UN CULTIVO

Mi laboratorio comenzó a trabajar con organoides en 2012, cuando Madeline A. Lancaster, a la sazón investigadora posdoctoral, ideó la forma de reproducir en una placa de cultivo los procesos esenciales que conducen a la formación del cerebro en un feto humano durante las diez primeras semanas del desarrollo. Nuestro procedimiento se basa en un tipo de células madre que presentan una característica extraordinaria denominada pluripotencialidad. Se trata del mismo tipo de células que se hallan en un embrión incipiente. Cuando se las cultiva en las condiciones apropiadas, pueden dar lugar a cualquier tipo de tejido, ya sea nervio, músculo, sangre, hueso o cualquier otro. En el feto, estas nuevas células solo mantienen la pluripotencialidad durante unos pocos días. Pero mediante cultivos especiales de laboratorio, pueden conservarse en ese estado y, en última instancia, ser convertidas en cualquier tipo de célula que queramos.

Para empezar, cultivamos las células en un líquido que contiene los nutrientes necesarios para el crecimiento del neuroectodermo, la parte del feto que da lugar al sistema nervioso. Cuando las células se agregan en una bola denominada cuerpo embrioide, introducimos esa bola en una sustancia denominada matrigel. Este gel, obtenido al cultivar células procedentes de un tumor cartilaginoso de ratón, se parece a la membrana sobre la que se asientan las células en el feto. El matrigel, rico en factores que estimulan la división celular y que evitan la muerte de las células, proporciona un soporte lo suficientemente rígido como para que las células se agarren a él, pero también es lo bastante maleable como para ser modificado por las células que, a su vez, alteran su forma.

El resultado de esos experimentos ha sido espectacular. En el interior del gel, los cuerpos embrioides crecen en las tres dimensiones para formar bolas blancas de tejido que se parecen al cerebro de un embrión humano. En presencia de las señales químicas apropiadas que inducen el desarrollo del cerebro fetal, las células madre crecen y dan lugar a réplicas exactas del prosencéfalo humano, la región responsable de las funciones

Minicerebros en una placa

La técnica que permite obtener distintos tejidos biológicos a partir de células madre se ha extendido ahora para generar una parte del cerebro que contiene la corteza y otras estructuras responsables de tareas complejas, como el procesamiento de información sensorial, la formación de recuerdos y la toma de decisiones. Para crear este minicerebro, se parte de una bola de células a la que se ofrecen nutrientes y un sustrato sobre el que crecer; a continuación, las células reproducen la mayor parte del proceso de desarrollo del embrión en sus primeras fases.

1 El procedimiento comienza con células madre embrionarias o con células madre pluripotentes inducidas capaces de convertirse en cualquier tipo celular del organismo. Las segundas se obtienen de células cutáneas o sanguíneas adultas modificadas genéticamente.

Célula madre embrionaria

Reprogramación de una célula adulta

Célula cutánea adulta

2 Días 0-5: Las células se dividen y se agregan formando unas bolas denominadas cuerpos embrioides. Al cabo de tres días, esas células empiezan a formar tres capas distintas: ectodermo, mesodermo y endodermo.

Diferentes tipos celulares

Cuerpos embrioides

3 Días 6-10: Los cuerpos embrioides, tras colocarlos en un líquido que contiene los nutrientes para la parte del feto que genera el sistema nervioso (el neuroectodermo), empiezan a organizarse en capas y dan lugar a los tejidos embrionarios que conforman el cerebro humano.

4 Días 11-15: Se introducen bolitas de neuroectodermo en matrigel, un medio rico en sustancias que estimulan la división de las células, evitan su muerte y proporcionan las condiciones adecuadas para el crecimiento de apéndices bulbosos, los precursores de las estructuras cerebrales completas.

Gotita de matrigel

Tejido neuroectodérmico

Apéndice bulboso

Células en proceso de maduración

5 Días 16-30. Se transfieren gotitas de matrigel a un biorreactor con sistema de agitación o a un aparato denominado incubador orbital. Dentro del gel, los cuerpos embrioides crecen hasta formar organoides cerebrales, unas estructuras tridimensionales de tejido blanco que se asemejan al prosencéfalo de un feto humano. Los organoides pueden utilizarse para estudiar el desarrollo del cerebro y los trastornos que aparecen en las primeras etapas de la vida.

Biorreactor con agitación

Organoide cerebral

Análogo

Prosencéfalo de un embrión de 10 semanas

Resultado: Tras nutrir la mezcla de células madre durante un mes, los cultivos se asemejan mucho al prosencéfalo de un embrión de 10 semanas. Esta región del cerebro incluye la corteza (la gran estructura plegada del exterior) y el plexo coroideo (la región que genera el líquido cefalorraquídeo).

Prosencéfalo totalmente formado

FUENTE: «GENERATION OF CEREBRAL ORGANOIDS FROM HUMAN PLURIPOTENT STEM CELLS», POR MADELINE A. LANCASTER Y JÜRGEN A. KNOBLICH EN *NATURE PROTOCOLS*, VOL. 9, OCTUBRE DE 2014; TAMI TOLPA (*ilustración*)

mentales superiores. Incluye componentes tales como la corteza (la gran estructura plegada externa) y el plexo coroideo (la región que genera el líquido cefalorraquídeo). También observamos otras estructuras que guían a las células hacia su ubicación correcta en el cerebro en desarrollo. Las eminencias ganglionares medial y lateral, que desempeñan esta función, intervienen en la generación de células que suelen reducir la actividad neural (interneuronas) y en el desarrollo del hipocampo, involucrado en la formación de recuerdos.

Las células de un organoide en crecimiento se disponen entre sí de manera idéntica a las de un cerebro humano fetal de entre 8 y 10 semanas de vida. En contadas ocasiones, los organoides llegan a formar pequeñas copas oculares, unas oquedades del tejido que contienen pigmentos coloreados, de modo muy parecido a como sucede cuando se empieza a formar el ojo humano. Al mismo tiempo, tal y como ocurre en un cerebro en desarrollo, las células se dividen y dan lugar a los tipos de neuronas presentes en un embrión. Estas proyectan axones, unas prolongaciones que establecen contacto con otras neuronas para formar una red de señalización activa. Antes de formar estas redes, las neuronas migran de una región a otra de un modo muy parecido a lo que sucede en el feto; ello puede proporcionar pistas sobre lo que ocurre cuando las neuronas terminan en el lugar equivocado, tal y como suele acontecer en los trastornos psiquiátricos.

A HOMBROS DE GIGANTES

La idea de crear tejidos en cultivos no es realmente nueva. Como ocurre con la mayoría de los descubrimientos científicos, el auge actual de los organoides se basa en años de investigaciones, algunas de las cuales tuvieron lugar hace más de un siglo. Ya en 1907, el zoólogo Henry Wilson había demostrado que ciertos animales inferiores, como las esponjas, se reconstruyen por sí mismos tras haber sido reducidos a células individuales, una indicación de que el cerebro dispone de un programa para el ensamblaje de sus innumerables componentes.

En 1939, Johannes Holtfreter descubrió que las diversas células de un embrión de rana se buscan entre sí y regeneran su forma incluso después de haber sido separadas por completo. Durante los años ochenta, este hallazgo dio lugar a un gran número de estudios de «reagregación»: se creaban en el laboratorio órganos complejos de animales, como la retina o incluso la corteza, simplemente mezclando sus diversos tipos celulares.

Basándose en experimentos de reagregación llevados a cabo entre 2006 y 2010, el difunto Yoshiki Sasai, del Centro RIKEN de Biología del Desarrollo, utilizó por primera vez células madre pluripotenciales para cultivar tejido nervioso, concretamente de la retina humana. De hecho, nuestra técnica de organoides cerebrales combinó sus técnicas con el trabajo revolucionario realizado por Hans Clevers, de la Universidad de Utrecht, quien mezcló células madre con matrigel para establecer un sistema de cultivo para obtener tejidos como el intestinal, el gástrico, e incluso el hepático y el pancreático.

Además de aplicar el conocimiento de esos estudios previos, nuestro trabajo utiliza técnicas novedosas que están poniendo patas arriba la investigación biomédica. Una de ellas, denominada reprogramación, fue desarrollada por el premio nóbel Shinya Yamanaka, de la Universidad de Kyoto (*véase* «Una década de reprogramación celular», por Megan Scudellari; Investigación y Ciencia, octubre de 2016). Mediante un sencillo conjunto de manipulaciones genéticas, la reprogramación vuelve a convertir células adultas del organismo en células madre pluripotenciales, y puede hacerlo con casi cualquier tipo de células, desde las cutáneas hasta las sanguíneas. Las células madre procedentes de una muestra de piel o de sangre pueden transformarse después en diversos tipos de células cerebrales, y estas pueden cultivarse entonces para obtener organoides. La estrategia elude, por tanto, el empleo de células procedentes de embriones.

La reprogramación permite generar un organoide a partir de células de un paciente con un trastorno genético y compararlo con otro procedente de un individuo sano. Se puede buscar así la causa fundamental de una enfermedad, ya que el defecto genético de las células del paciente deberían afectar al organoide de la misma manera que al feto en desarrollo. De hecho, ya hemos utilizado la técnica de los organoides para saber más sobre la microcefalia, un trastorno en el que los afectados nacen con un cerebro de tamaño muy reducido. Descubrimos que los organoides derivados de un paciente con microcefalia son mucho más pequeños de lo normal. Como es posible cultivar un número ilimitado de células del enfermo, ahora podemos llevar a cabo un análisis detallado de la cadena de acontecimientos moleculares que conduce a la microcefalia en un feto en desarrollo. Y lo mismo debería ocurrir con otros trastornos neurológicos: utilizar las células del paciente para cultivar organoides puede ayudar a comprender mejor los defectos en la formación del cerebro que causan esquizofrenia, epilepsia y otras enfermedades cuyo estudio en animales resulta difícil o imposible.

Los organoides procedentes de células reprogramadas de individuos sanos también pueden resultar útiles. De hecho, ya se han utilizado durante la actual epidemia del zika, a la que se considera responsable de provocar microcefalia en una serie de bebés nacidos de mujeres infectadas durante la gestación. Numerosos laboratorios que están trabajando con organoides, primero en Brasil y posteriormente en los Estados Unidos, ya han establecido que el virus puede provocar microcefalia, una conexión que continuaría siendo una hipótesis de no ser por esta nueva técnica. Cuando se infectan minicerebros con el virus del Zika, sus neuronas mueren y los organoides resultantes son mucho más pequeños que los homólogos no infectados, y guardan un gran parecido con los derivados de un paciente con microcefalia.

Es muy probable que la técnica ayude a desvelar otros conocimientos sobre el zika. Si cultivamos múltiples organoides e infectamos cada uno de ellos con cepas víricas de distintas regiones del mundo, quizás averigüemos por qué el virus causa microcefalia en algunas zonas pero no en otras. Tal vez nos permitan también determinar por qué solo algunos individuos desarrollan microcefalia tras haber sido expuestos al virus. Podemos emplearlos para identificar el punto de anclaje, o receptor, utilizado por el virus para entrar en las células. Y pueden resultar esenciales para probar posibles fármacos contra el zika antes de administrarlos a pacientes en ensayos clínicos.

Una segunda técnica que está sacando provecho de los organoides es la ingeniería genómica, un conjunto de métodos que permite alterar el código genético de una célula. Los organoides modificados genéticamente para que incorporen mutaciones sospechosas de provocar una enfermedad pueden ayudar a determinar si los defectos genéticos promueven realmente esa enfermedad. En última instancia, podría evaluarse si la reparación de esas mutaciones generaría organoides sanos; de ser así, el trabajo daría lugar a nuevos tratamientos para contrarrestar los efectos de las mutaciones.

Los neurocientíficos están ansiosos por explorar otras aplicaciones de los minicerebros, como el desarrollo de fármacos. La técnica puede determinar si los nuevos medicamentos afectan al tejido nervioso del modo deseado sin necesidad de llevar a cabo experimentos con animales, por lo que se reducirían los costes del desarrollo del fármaco. Los organoides también pueden ayudar a identificar los efectos indeseados de un fármaco sobre el cerebro humano en desarrollo. De este modo, se evitaría administrar a una embarazada los medicamentos que pudieran causar daños al feto. Si la tristemente célebre talidomida, que afecta al cerebro fetal durante las etapas tempranas del embarazo y provoca otros defectos congénitos, se hubiese analizado de esta forma, probablemente nunca hubiese sido recetada a las mujeres gestantes en los años cincuenta y sesenta del pasado siglo para aliviar las náuseas matutinas.

Los organoides se están convirtiendo en una herramienta inestimable para los biólogos evolutivos. Pueden utilizarse para identificar los genes responsables de nuestro enorme tamaño cerebral con respecto al de otros primates. La comparación del genoma humano con el de los primates ya ha permitido determinar los genes que podrían ser responsables de las funciones cognitivas propias nuestra de especie, como el lenguaje. Sin embargo, el modo como funcionan estos genes sigue desconociéndose en gran medida. Ahora, los científicos pueden introducir en organoides genes extraídos de monos y simios para averiguar cómo afectan al desarrollo del cerebro. También pueden insertar genes o regiones enteras del genoma en un organoide de mono para que su funcionamiento se asemeje al del cerebro humano.

TEMORES ANTE LA TÉCNICA

Seguramente, la idea de cultivar un cerebro humano en una placa de laboratorio hará que algunas personas se escandalicen. Nos vienen a la mente películas como *Matrix*, que evocan fantasías sobre cerebros creados en el laboratorio que desarrollan pensamientos o incluso personalidades. Estos temores resultan infundados. La probabilidad de que un minicerebro desarrolle una mente por su cuenta es nula. Un organoide no es un «humanoide» en un frasco y no lo será ni siquiera en un futuro lejano. Cualquier ser consciente necesita procesar la información procedente de los sentidos para desarrollar un modelo mental interno de la realidad. Los organoides no pueden ver ni oír, y no reciben ningún tipo de señal de los sentidos. Incluso si lográsemos conectarlos a una cámara y a un micrófono, la información visual y auditiva que les llegase aún tendría que ser traducida a una forma que pudiese ser comprendida por estas neuronas cultivadas; y, tal y como están las cosas, llevar a cabo esa interpretación representa un desafío técnico insuperable.

Los organoides no son cerebros funcionales, sino tan solo una masa de tejido que imita el funcionamiento molecular y celular del órgano con un nivel de detalle espectacular. Se parecen a los fragmentos de tejido que se extraen durante una intervención neuroquirúrgica; no son en absoluto seres conscientes.

Aun así, el cultivo de organoides suscita ciertos problemas éticos y legales. Todos proceden de células extraídas de individuos que poseen ciertos derechos. Por ello, para obtener minicerebros hay que cumplir con los mismos protocolos legales y éticos que se aplican en cualquier país industrialmente desarrollado para las muestras extraídas de pacientes. Por supuesto, los pacientes tienen que dar primero el permiso para que sus células puedan emplearse para la investigación. Pero incluso tras haber explicado claramente los beneficios de la técnica, es posible que los donantes, al principio, no se sientan cómodos con la idea de que se cultiven sus células para que formen estructuras parecidas a un cerebro.

¿Y AHORA QUÉ?

Las ventajas del nuevo método superan cualquier posible inconveniente. Los organoides cerebrales han sentado las bases para poder llevar a cabo experimentos médicos y toxicológicos realistas en tejido humano sin necesidad de hacer experimentos con animales. Aun así, tanto a mí como a otros nos gustaría mejorarlos. Por ejemplo, la generación actual de organoides carece de vasos sanguíneos. Esa ausencia no es un problema durante sus primeras etapas del desarrollo, pero, con el tiempo, las células empiezan a morir a causa de la falta de oxígeno y de nutrientes. En teoría, debería ser posible incluir vasos sanguíneos, bien mediante las nuevas técnicas de impresión en 3D, o bien haciéndolos crecer a partir de células madre. Sabemos que los vasos sanguíneos se desarrollan en el cerebro, un proceso que podría reproducirse en un cultivo tridimensional.

Otro reto consiste en fabricar un organoide que, tal y como ocurre en un cerebro real, presente los ejes anteroposterior, transversal y sagital. A diferencia de un embrión real, que presenta ejes corporales claramente definidos, los organoides carecen de ejes anteroposterior y transversal. En consecuencia, se desarrollan aleatoriamente, de modo que sus componentes individuales presentan orientaciones distintas. En el cerebro en desarrollo, los complejos sistemas de señalización proporcionan al cerebro un sentido de lo que está encima y lo que está debajo; los compuestos químicos implicados podrían, en última instancia, hacer lo mismo en los organoides. Los modernos métodos biotecnológicos permiten generar cultivos de tejidos que contengan los compuestos necesarios para estimular el crecimiento celular durante el desarrollo. Estas técnicas puedan dar lugar, finalmente, a la formación de organoides con un prosencéfalo en un extremo y un rombencéfalo en el otro.

Ya hemos empezado a dar los primeros pasos para intentar descubrir la forma de superar esas barreras. Hemos realizado proezas técnicas que hace unos pocos años parecían un sueño. Los organoides ya nos están ayudando a conocer mejor las enfermedades y a desarrollar posibles fármacos. La capacidad para cultivar partes de un cerebro y trabajar con la muestra viva ha abierto un capítulo totalmente nuevo en la investigación biológica, ya que permite obtener cultivos muchísimo más realistas, los cuales, a veces, incluso representan una alternativa razonable al empleo de animales con fines experimentales. MyC

PARA SABER MÁS

Organogenesis in a dish: Modeling development and disease using organoid technologies. Madeline A. Lancaster y Juergen A. Knoblich en *Science*, vol. 345, pág. 283, 18 de julio de 2014.

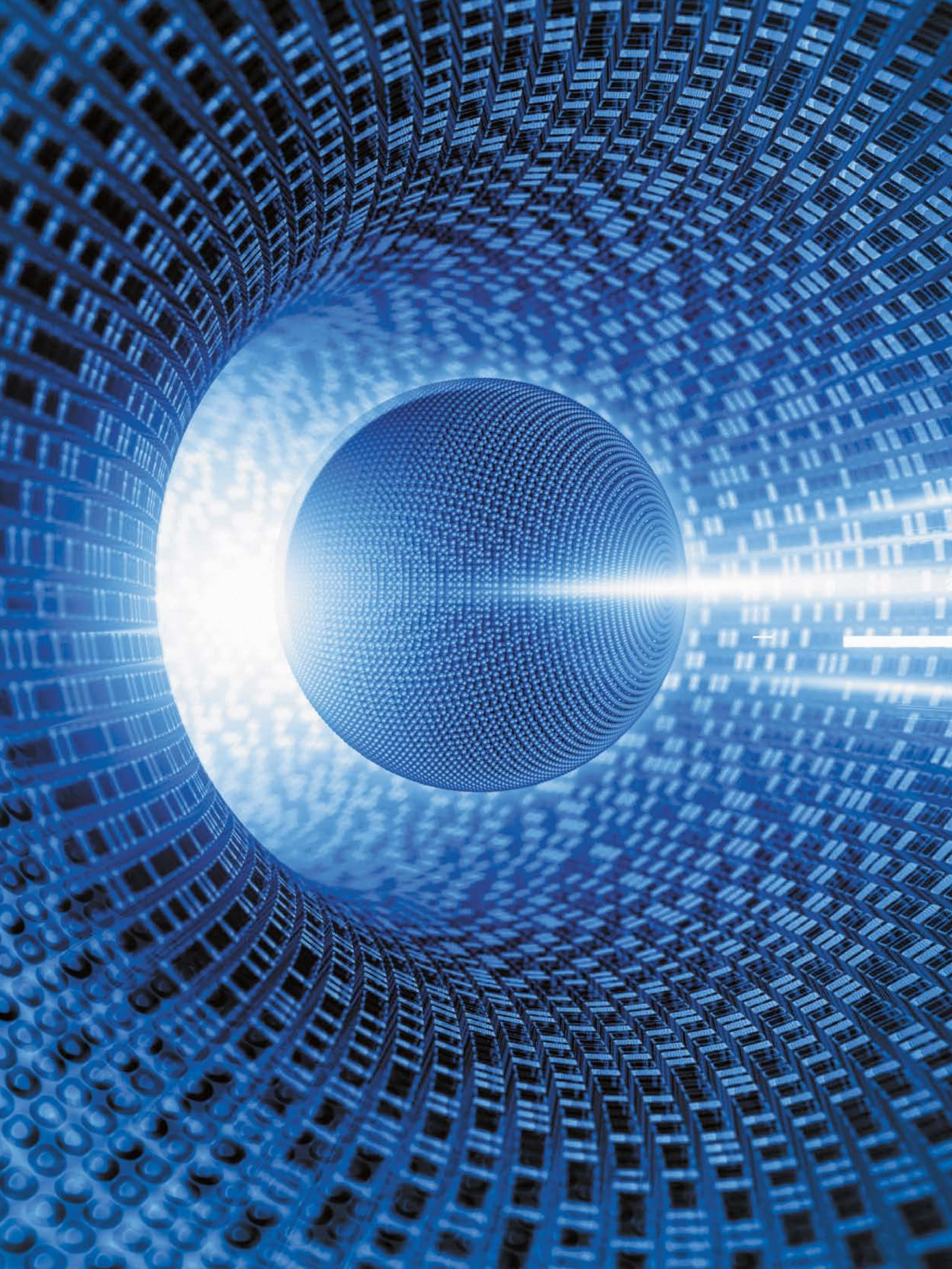
Generation of cerebral organoids from human pluripotent stem cells. Madeline A. Lancaster y Juergen A. Knoblich en *Nature Protocols*, vol. 9, págs. 2329-2340, octubre de 2014.

Dishing out mini-brains: Current progress and future prospects in brain organoid research. Iva Kelava y Madeline A. Lancaster en *Developmental Biology*. Publicado en línea el 9 de julio de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cultivo ocular. Yoshiki Sasai en *IyC*, enero de 2013.

Pequeños cerebros artificiales para investigar. Christian Wolf en *MyC* n.° 83, 2017.





FÍSICA CUÁNTICA

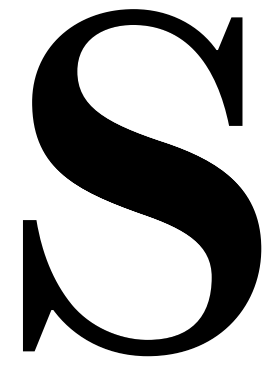
Enredados en el espaciotiempo

El proyecto It from Qubit se propone investigar si el espacio y el tiempo surgieron a partir del entrelazamiento cuántico de pequeños fragmentos de información

Clara Moskowitz

Clara Moskowitz es redactora de *Scientific American*. Se graduó en física y astronomía en la Universidad Wesleyan y posee un título de posgrado en periodismo científico por la Universidad de California en Santa Cruz.





SHAKESPEARE ESCRIBIÓ QUE EL MUNDO ES UN GRAN ESCENARIO. LOS FÍSICOS TIENDEN a estar de acuerdo con él; para ellos, ese escenario no es otra cosa que el espacio, visto a menudo como un mero telón de fondo sobre el que transcurre una obra protagonizada por fuerzas y campos. Según esta visión de las cosas, el espacio mismo no estaría hecho de nada más.

Sin embargo, hace un tiempo que los expertos han comenzado a poner en duda esta forma de pensar. El espacio (o, usando el lenguaje de la relatividad, el espaciotiempo) podría estar compuesto de pequeños fragmentos de información. Al interaccionar entre sí, esas unidades básicas darían lugar al espaciotiempo y a propiedades como su curvatura, que, a su vez, origina la gravedad. De ser correcta, la propuesta no solo explicaría la naturaleza del espaciotiempo, sino que ayudaría a encontrar la largamente buscada teoría cuántica de la gravedad: una formulación que combinase la relatividad general y la mecánica cuántica, dos teorías fundamentales que no parecen llevarse especialmente bien. Esta emocionante posibilidad ha llevado a centenares de físicos a reunirse cada tres meses bajo el auspicio de un nuevo proyecto de investigación: It from Qubit.

Aquí *it* («eso») hace referencia al espaciotiempo en sí. Q*ubit* designa la unidad básica de información en física cuántica, algo similar a los bits de nuestros ordenadores pero a nivel cuántico. La idea que alimenta el proyecto es la posibilidad de que el universo emerja a partir de una especie de código subyacente: si los físicos lograsen descifrarlo, entenderían finalmente la naturaleza cuántica de los sucesos a gran escala que tienen lugar en el cosmos. Uno de los encuentros de It from Qubit (IfQ) se celebró en julio de 2016 en el Instituto Perimeter de Física Teórica, en Ontario. Los organizadores esperaban la participación de unos 90 científicos, pero se encontraron con tantas solicitudes que terminaron admitiendo a 200 y organizando hasta seis sesiones simultáneas en otras universidades. «Creo que se trata de una de las líneas de investigación más prometedoras, si no la que más, para dar con una teoría cuántica de la gravedad», asegura Netta Engelhardt, investigadora posdoctoral en la Universidad de Princeton que, aun sin formar parte oficial de IfQ, ha asistido a algunos de sus encuentros.

Al conjugar la computación cuántica con el estudio del espaciotiempo y la relatividad general, el proyecto pone en contacto a dos grupos de expertos que no suelen colaborar mucho entre sí: por un lado, especialistas en teoría cuántica de la información; por otro, físicos de altas energías y teoría de cuerdas. Hace más de un año, la Fundación Simons, una organización privada que fomenta la investigación en ciencia y matemáticas, concedió la subvención que permitió poner en marcha IfQ y financiar los trabajos de investigación y las reuniones. Desde entonces, el interés por el proyecto ha aumentado y los sucesivos encuentros han congregado a un número cada vez mayor de investigadores, tanto miembros de la colaboración como otros que simplemente se sienten atraídos por la idea. «El proyecto intenta dilucidar cuestiones de gran importancia pero también muy complejas», señala Beni Yoshida, investigador posdoctoral del Instituto Perimeter y colaborador de IfQ. «La colaboración es necesaria, ya que se trata de un problema que una persona sola no puede resolver.»

Incluso los expertos que no forman parte de IfQ han tomado nota. «Si la relación con la teoría cuántica de la información se demuestra tan exitosa como algunos anticipan, podría desencadenar la próxima revolución en nuestra comprensión del espaciotiempo», sostiene Brian Greene, teórico de cuerdas de la Universidad de Columbia que no está implicado en IfQ. «Es algo de enorme importancia y muy emocionante», apostilla.

ENTRELAZAR EL ESPACIOTIEMPO

La idea de que el espaciotiempo derive de constituyentes más básicos se aleja de la visión tradicional que ofrece la relatividad general. Esta nueva imagen sostiene que, en lugar de tratarse de un ente fundamental, el espaciotiempo «emerge» a partir de interacciones entre qubits. Pero ¿qué son exactamente esos bits y qué tipo de información contienen? Por el momento, los expertos lo ignoran, aunque curiosamente eso no parece molestarles demasiado. Brian Swingle, investigador posdoctoral de Stanford y colaborador de IfQ, asegura que lo importante son las relaciones entre los bits, no tanto los bits en sí: «Es en esas relaciones colectivas donde radica la riqueza de la propuesta. El elemento esencial no son los constituyentes mismos, sino la manera en que se organizan».

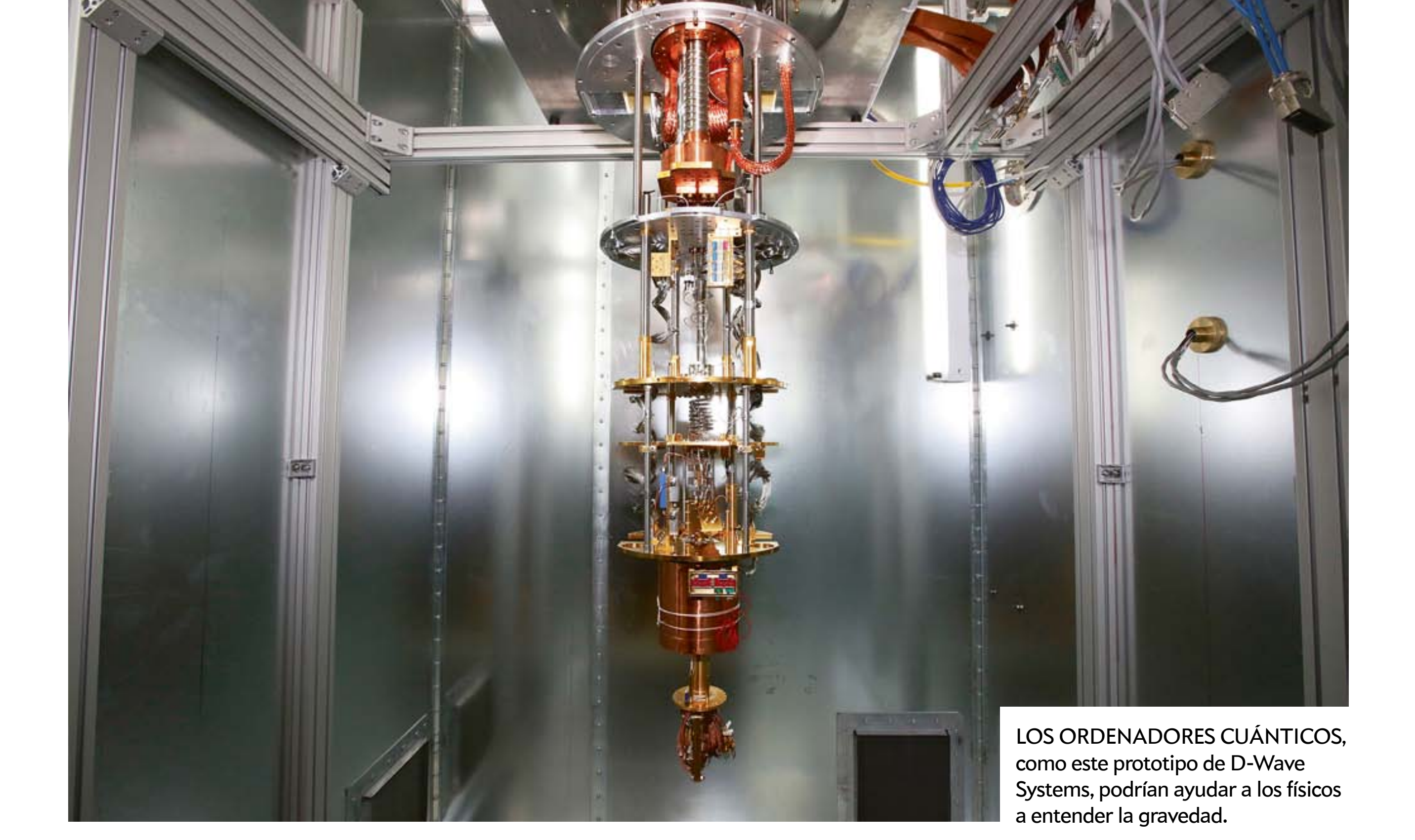
EN SÍNTESIS

Varias investigaciones recientes sugieren que el espaciotiempo podría emerger a partir de unidades básicas de información. Dichos constituyentes estarían «trenzados» gracias al entrelazamiento cuántico.

Un proyecto de reciente creación, It from Qubit, ha reunido a varios expertos en teoría cuántica de la información, física de partículas y teoría de cuerdas para explorar las implicaciones de esa idea.

La meta última de la colaboración consiste en formular una teoría cuántica de la gravedad. Aún está por ver si los modelos matemáticos simplificados con los que trabajan los físicos pueden extenderse para describir nuestro universo.

PÁGINAS ANTERIORES: KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS



LOS ORDENADORES CUÁNTICOS, como este prototipo de D-Wave Systems, podrían ayudar a los físicos a entender la gravedad.

KIM STALLKNECHT, REDUX PICTURES

La clave de dicha organización podría hallarse en el extraño fenómeno del entrelazamiento cuántico, una singular correlación entre partículas en la que las acciones efectuadas sobre una de ellas parecen afectar a las otras, incluso cuando se encuentran separadas por grandes distancias. «Una idea fascinante propone que el espaciotiempo estaría trenzado por medio del entrelazamiento cuántico de los "átomos" que lo componen», explica Vijay Balasubramanian, físico de la Universidad de Pensilvania y uno de los investigadores principales de IfQ. «De ser cierto, sería asombroso», añade.

El razonamiento que subyace a dicha idea se basa en una serie de descubrimientos efectuados durante los últimos años. En un artículo publicado en 2006, Shinsei Ryu, ahora en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y Tadashi Takayanagi, de la Universidad de Kioto, demostraron la existencia de cierta conexión entre el entrelazamiento cuántico y la geometría del espaciotiempo. Sobre este resultado, los físicos Juan Maldacena, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, y Leonard Susskind, de Stanford, hallaron en 2013 que, al entrelazar dos agujeros negros, se genera entre ellos un agujero de gusano: cierto tipo de «atajo» en el espaciotiempo predicho por la relatividad general. Este descubrimiento (apodado ER=EPR, debido a la jerga empleada por los físicos para referirse a los agujeros de gusano y al entrelazamiento cuántico, tomada a su vez de los apellidos de los físicos que introdujeron dichos conceptos) y otros similares sugieren que el entrelazamiento, del que hasta ahora se pensaba que no implicaba ninguna conexión física, puede generar estructuras en el espaciotiempo.

Para entender cómo puede ocurrir algo así, primero hemos de recordar cómo funciona el entrelazamiento en mecánica cuántica. Este fenómeno fue calificado como «fantasmal» por Albert Einstein, quien predijo su existencia en 1935 junto con Boris Podolsky y Nathan Rosen. El entrelazamiento implica un vínculo instantáneo entre partículas distantes que, a primera vista, parece desafiar el principio de que nada puede viajar más rápido que la luz. En su forma tradicional, se refiere a ciertas correlaciones que afectan a una propiedad determinada (el espín, por ejemplo) de dos o más partículas del mismo tipo separadas en el espacio. En los últimos años, sin embargo, los expertos han comenzado a considerar entrelazamientos de otra clase. «El habitual no basta», señala Balasubramanian. «He llegado a la conclusión de que existen otras formas de entrelazamiento relevantes para el proyecto de reconstruir el espaciotiempo.» Por ejemplo, podrían entrelazarse partículas de un tipo con partículas de otro situadas en el mismo lugar, por lo que en ese caso no intervendrían grandes distancias. Los físicos también han comenzado a abordar las complicaciones que aparecen al entrelazar un gran número de partículas.

Una vez clarificada la dinámica del entrelazamiento, los investigadores esperan entender cómo surge el espaciotiempo. Sería algo parecido a la manera en que los movimientos microscópicos de las moléculas del aire dan lugar a fenómenos complejos, como los que describe la termodinámica o la meteorología. «Cuando estudiamos un sistema a escalas cada vez mayores, obtenemos una imagen que no parece guardar relación con la dinámica a distancias cortas. Ese es uno de los aspectos más fascinantes de IfQ, ya que en realidad no entendemos la dinámica cuántica fundamental a partir de la cual surge el espaciotiempo», explica Engelhardt.

HOLOGRAMAS CÓSMICOS

El objetivo último de todo este trabajo consiste en formular una teoría que describa la gravedad desde una perspectiva cuántica. Quienes persiguieron esa meta en el siglo pasado vieron frustradas sus expectativas una y otra vez. Ahora, sin embargo, los físicos de IfQ cuentan con una nueva idea: el principio holográfico.

Dicho principio sostiene que ciertas teorías físicas resultan equivalentes a teorías de otra clase formuladas en un universo de menos dimensiones; algo parecido a la manera en que toda la información necesaria para generar el holograma tridimensional de un unicornio puede codificarse en una placa bidimensional. Así pues, a la vista de las dificultades que entraña formular una teoría cuántica de la gravedad, tal vez fuese posible encontrar

una teoría equivalente pero más manejable, la cual estaría formulada en un universo con menos dimensiones que el nuestro.

Una de las encarnaciones más exitosas del principio holográfico es la llamada «correspondencia AdS/CFT», donde las siglas abrevian el tecnicismo «anti De Sitter/teoría de campos conforme». La idea implica la posibilidad de describir lo que ocurre en el interior de un agujero negro (un volumen de tres dimensiones) en términos de una teoría física definida en su «frontera» bidimensional. Maldacena formuló esta correspondencia a finales de los años noventa en el contexto de la teoría de cuerdas, la cual postula que las partículas elementales son en realidad pequeños objetos vibrantes de una dimensión.

La correspondencia AdS/CFT tal vez permita a los físicos formular una teoría equivalente a la gravedad cuántica —una que lograse los mismos objetivos y que describiese la misma física— en términos de otra mucho más manejable; en concreto, en términos de una que no contendría la gravedad en absoluto. «Las teorías que incluyen la gravedad resultan muy difíciles de formular desde un punto de vista cuántico; sin embargo, las que no contienen la gravedad son mucho más fáciles de describir por completo», explica Balasubramanian. Llegados a este punto, surge una pregunta obvia: ¿cómo es posible que una teoría que excluye la gravedad pueda convertirse de repente en una teoría de gravedad cuántica? La clave radica en que, tal vez, lo que interpretamos como la gravedad y el espaciotiempo no sea más que el producto final del entrelazamiento cuántico. En otras palabras, quizás el entrelazamiento permita codificar la

Tal vez lo que interpretamos como la gravedad y el espaciotiempo no sea más que el producto final del entrelazamiento cuántico

información de un volumen tridimensional en bits almacenados en la frontera bidimensional de dicho volumen.

En los últimos veinte años, los físicos han comprobado que la correspondencia AdS/CFT funciona: una teoría bidimensional puede describir la física en tres dimensiones, algo que los expertos denominan «dualidad». Sin embargo, aún no entienden bien por qué funciona. «Sabemos que ambas teorías son duales, pero aún no está completamente claro qué es lo que hace que la dualidad funcione», señala Swingle. «Uno de los resultados que podemos esperar [de IfQ] es una teoría que explique el porqué de esas dualidades. Estoy convencido de que esta colaboración puede resolver y resolverá este problema, o al menos producirá avances relevantes en esa dirección», afirma el investigador.

La teoría cuántica de la información podría resultar de utilidad porque ciertas herramientas empleadas en esa disciplina, los códigos cuánticos de corrección de errores, parecen surgir asimismo en la correspondencia AdS/CFT. En el contexto de la computación cuántica, tales códigos fueron diseñados para evitar la pérdida de información que tiene lugar cuando algo externo interfiere en el entrelazamiento de los qubits. Los ordenadores cuánticos, en lugar de almacenar la información en bits individuales, utilizan estados entrelazados de varios bits, ya que eso

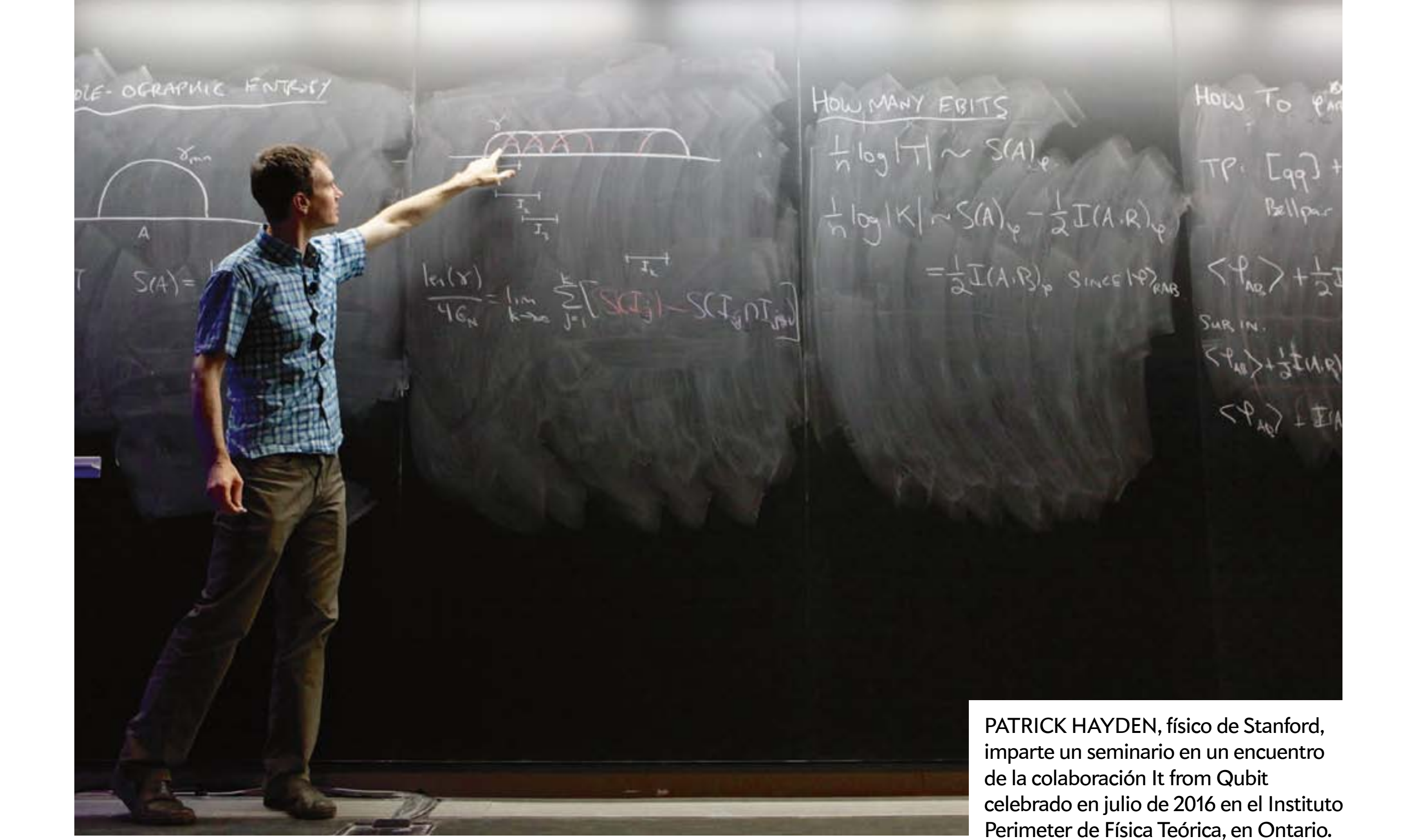
evita que un solo error destruya información. Y, curiosamente, las mismas relaciones matemáticas que se emplean en dichos códigos aparecen también en AdS/CFT. Es como si la misma estructura usada para entrelazar múltiples bits y obtener un sistema a prueba de errores fuese también la responsable de codificar la información del interior de un agujero negro y proyectarla en su superficie. «Es fascinante que encontremos códigos cuánticos de corrección de errores en los agujeros negros», asegura Dorit Aharonov, experta en información cuántica de la Universidad Hebrea de Jerusalén y una de las investigadoras principales de IfQ. «¿Por qué demonios tendría que pasar?», se pregunta.

Pero incluso si los físicos consiguieran entender cómo funciona la correspondencia AdS/CFT y, a partir de ahí, encontrasen una teoría de dimensionalidad más baja que reemplazase a la gravedad cuántica, aún estarían lejos de su objetivo final. La correspondencia AdS/CFT no es más que un «modelo de juguete» del universo, una versión simplificada del cosmos que conocemos. El comportamiento de la gravedad en el mundo real no se aplica al universo idealizado en el que la correspondencia funciona. «Es cierto que AdS/CFT contiene una forma de gravedad, pero no es la misma que la del universo en expansión en el que vivimos», explica Swingle. «En realidad, lo que describe la dualidad AdS/CFT es algo así como un universo en una botella: si disparas un rayo de luz desde el interior, rebotará en las paredes. Pero eso no ocurre en nuestro universo en expansión.» La correspondencia AdS/CFT proporciona un campo de juego teórico muy conveniente para poner a prueba las ideas y en el que, debido a su simplicidad, la gravedad cuántica puede abordarse con más facilidad. «La esperanza es que sea una parada intermedia útil para entender la gravedad cuántica en nuestro propio universo», apunta el investigador.

Dado que IfQ parte de hipótesis que no son realistas, algunos escépticos se preguntan por su utilidad. «Se trata sin duda de una crítica muy legítima», admite Engelhardt. «¿Por qué nos fijamos en este modelo de juguete? Todo depende de la validez del modelo y de la idea de que, en último término, acabará siendo representativo de nuestro universo. Me gustaría asegurarme de que, entendiendo este modelo de juguete, aprenderemos algo del universo real.» La apuesta de los científicos de IfQ es que, si comienzan con una descripción idealizada en la que resulta posible trabajar con facilidad, más tarde podrán añadir la complejidad necesaria y trasladarla al mundo real.

LA RECOMPENSA

A pesar de todas las dudas, tanto los científicos de la colaboración como quienes no pertenecen a ella defienden que la estrategia



PATRICK HAYDEN, físico de Stanford, imparte un seminario en un encuentro de la colaboración It from Qubit celebrado en julio de 2016 en el Instituto Perimeter de Física Teórica, en Ontario.

CORTESÍA DE JONGBUM PARK, INSTITUTO PERIMETER DE FÍSICA TEÓRICA

merece la pena. De hecho, ya se han abierto nuevas líneas de investigación. «Durante largo tiempo he tenido la sensación de que el vínculo entre teoría cuántica de la información y gravedad cuántica reviste una importancia fundamental», afirma Raphael Bousso, físico de la Universidad de California en Berkeley que, aunque no forma parte de IfQ, ha colaborado con varios de sus integrantes. «Esa conexión se ha hecho más profunda con el paso de los años y me entusiasma ver que tantos investigadores de primera línea están trabajando juntos para afrontar estas preguntas y ver a dónde nos llevan.» Eva Silverstein, física teórica de Stanford que tampoco pertenece a IfQ, coincide con Bousso: «No cabe duda de que merece la pena desarrollar y aplicar ideas de teoría cuántica de la información a estos problemas. Pero para entender la dinámica [de la gravedad cuántica] se necesita mucho más. Es importante que los expertos en el campo no se centren demasiado en una sola manera de enfocar el problema.»

Con todo, aunque el proyecto no culmine con la formulación de una teoría cuántica de la gravedad, es muy probable que sí rinda otros beneficios. Aplicar la teoría de cuerdas y la relatividad general a problemas de teoría cuántica de la información podría ayudar, por ejemplo, a definir con mayor precisión los diferentes tipos de entrelazamiento. Ello contribuiría a entender mejor el espaciotiempo y, también, a avanzar en la construcción de un ordenador cuántico. «Cuando empiezas a aplicar estas herramientas en un contexto nuevo, es muy probable que surjan ideas interesantes que puedan resultar útiles en otras áreas», señala Aharonov. «Parece que empieza a haber progresos en cuestiones que han estado abiertas durante años. Es emocionante.» Por ejemplo, los investigadores han descubierto cómo podría medirse el tiempo en el interior de un agujero de gusano al concebir este como un circuito cuántico.

Además, combinar la teoría cuántica de la información con la teoría de cuerdas podría resultar útil no solo para obtener una formulación de la gravedad cuántica, sino para evaluar cualquier otra teoría. Toda teoría física puede entenderse como un ordenador, cuyas entradas y salidas corresponden a los estados iniciales y finales que resulta posible medir. Y algunos ordenadores son más potentes que otros. Por eso, una vez formulada una teoría de gravedad cuántica, los investigadores podrán preguntarse por el poder computacional de la teoría. «Si fuese demasiado grande, si nuestro modelo de gravedad cuántica permitiese calcular cosas que no creemos que puedan calcularse en nuestro universo, su validez estaría en duda», apunta Aharonov. «Es una forma de decidir, usando un punto de vista diferente, si una teoría es adecuada o no.»

A algunos físicos el proyecto les trae a la cabeza días pasados en los que otras grandes ideas comenzaban a gestarse. «Comencé mi tesis doctoral en 1984, cuando tuvo lugar la llamada “primera revolución” de la teoría de cuerdas», rememora Hiroshi Ooguri, del Instituto de Tecnología de California. «Fue una época muy emocionante en la que la teoría de cuerdas se postulaba como la principal candidata a una teoría unificada de todas las interacciones. Ahora percibo esta explosión de entusiasmo de forma similar. Vivimos sin duda un momento apasionante para los investigadores jóvenes en el campo y también para aquellos que acabamos nuestro doctorado hace décadas.» IyC

PARA SABER MÁS

The large-*N* limit of superconformal field theories and supergravity. Juan Maldacena en *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 38, n.º 4, págs. 1113-1133, abril de 1999.
Cool horizons for entangled black holes. Juan Maldacena y Leonard Susskind en *Fortschritte der Physik*, vol. 61, n.º 9, págs. 781–811, septiembre de 2013.
Página web del proyecto It from Qubit: **https://www.simonsfoundation.org/mathematics-and-physical-science/it-from-qubit-simons-collaboration-on-quantum-fields-gravity-and-information/**

EN NUESTRO ARCHIVO

El espacio, ¿una ilusión? Juan Maldacena en *IyC*, enero de 2006.
Geometría y entrelazamiento cuántico. Juan Maldacena en *IyC*, noviembre de 2015.

ECOLOGÍA

Secuestro de carbono en los suelos forestales

La reforestación de los terrenos baldíos contribuye a retirar carbono de la atmósfera. Pero sus efectos solo se notan a largo plazo, y quizá no sea siempre la mejor opción

Pere Rovira



Pere Rovira es investigador del Centro Tecnológico Forestal de Cataluña, en Solsona. Sus estudios se centran en la transformación que experimenta la materia orgánica edáfica como consecuencia del cambio climático y los cambios de uso del suelo.



El cambio climático es, en pocas palabras, la consecuencia de un desequilibrio en el ciclo del carbono. Uno de sus componentes, la atmósfera, está recibiendo desde hace aproximadamente un siglo y medio aportes de carbono muy superiores a los que recibiría de forma natural. Tales aportes se derivan en general de las actividades humanas y, muy en particular, del uso de carbono fósil. Su combustión en motores y centrales térmicas genera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2), un gas que se acumula en la atmósfera y tiene efecto invernadero, lo que da lugar al calentamiento del planeta.

En el medio terrestre, el carbono se acumula principalmente en los suelos. Este elemento se encuentra allí en dos formas: la orgánica y la inorgánica. El carbono orgánico corresponde a la materia orgánica procedente de los restos vegetales muertos (hojarasca, raíces, etcétera) que se incorporan al suelo para sufrir un proceso de descomposición y humificación (transformación en humus). El inorgánico forma parte de los carbonatos y los fragmentos de roca caliza del suelo y es muy estable en su conjunto: sus cambios ocurren a escalas de tiempo de miles o incluso millones de años. El carbono orgánico, en cambio, es mucho más dinámico: puede aumentar o disminuir en escalas de tiempo de décadas o siglos, y, acaso lo más importante para nosotros, podemos gestionarlo. Por ello, la mayor parte de los estudios acerca del ciclo del carbono en los suelos se centran en el carbono orgánico, y cuando se refieren a las reservas de carbono edáfico, sin más, se refieren a él. En el presente artículo seguiremos también este criterio.

La cantidad de carbono que albergan los suelos suele ser superior a la que retiene la vegetación y, en comparación, también más estable. Esta reserva de carbono edáfico depende, entre otros factores, del tipo de vegetación. Favorecer la expansión de comunidades vegetales que acumulan más carbono edáfico es, por tanto, una forma obvia de secuestrar carbono en los suelos. Los bosques suelen asociarse con suelos ricos en materia orgánica (y por tanto, en carbono), mientras que las zonas cultivadas suelen asociarse con suelos pobres en carbono. Los cultivos son cruciales por razones obvias: alimentan a la población humana. Suprimirlos, sin más, es sencillamente impensable. Pero cuando se abandonan —por ejemplo, debido a una rentabilidad ínfima—, se plantea la cuestión de qué hacer con los terrenos que quedan disponibles. A menudo se ha propuesto la idea de reforestarlos para favorecer el secuestro de carbono atmosférico en el suelo y mitigar así los efectos del cambio climático.

¿Cuál es, en realidad, la eficacia de tal práctica? La respuesta a esta simple pregunta es, de hecho, compleja. El objeto de este artículo es aportar información a este debate. Para ello analizamos los diversos factores que influyen en la retención de carbono orgánico en el suelo. Basándonos en la información disponible, examinamos cuáles serían las consecuencias de la reforestación en los suelos de España, teniendo en cuenta la variedad de regiones climáticas y tipos de vegetación que el país alberga.

EL SUELO, UN FACTOR CLAVE

Antes de entrar a discutir el tema de la reforestación, debemos comentar la función esencial que ejercen los suelos como almacén de carbono. En varias ocasiones se ha intentado estimar la reserva mundial de carbono en los suelos. El resultado varía ligeramente de un autor a otro, pero, en conjunto, gira en torno a los 1600 petagramos (1 petagramo = 10^{15} gramos = 1.000.000.000 toneladas). Suele mencionarse que el carbono acumulado en los suelos del mundo es, en cifras redondas, el doble del almacenado en la vegetación. Ello da una idea de la relevancia de los suelos en cuanto a sumideros de carbono. Sin embargo, todavía es una cantidad pequeña, si la comparamos con la que debió de almacenar antes de la revolución neolítica.

La roturación a gran escala de bosques, prados o matorrales para su conversión en cultivos ha provocado a lo largo de la historia pérdidas enormes de carbono del suelo, el cual se ha transferido a la atmósfera. Se llevó a cabo en tiempos históricos en Oriente Próximo, China, Europa, los valles del Ganges y del Indo, Mesoamérica y, en general, en cualquier lugar en que se diera el paso de deforestar de forma masiva la tierra disponible para dedicarla a la agricultura. Y sigue realizándose hoy en zonas como la Amazonia, Indonesia, África y dondequiera que las necesidades de suelo para el cultivo vayan en este sentido. Solo que hoy tenemos edafólogos para estudiar este fenómeno y cuantificarlo. Se han realizado muchos estudios acerca de la pérdida de carbono edáfico como consecuencia de la conversión

EN SÍNTESIS

Aumentar el contenido de los suelos en carbono orgánico, procedente sobre todo de la descomposición de los residuos vegetales, permitiría atenuar el exceso de CO_2 atmosférico, responsable del cambio climático.

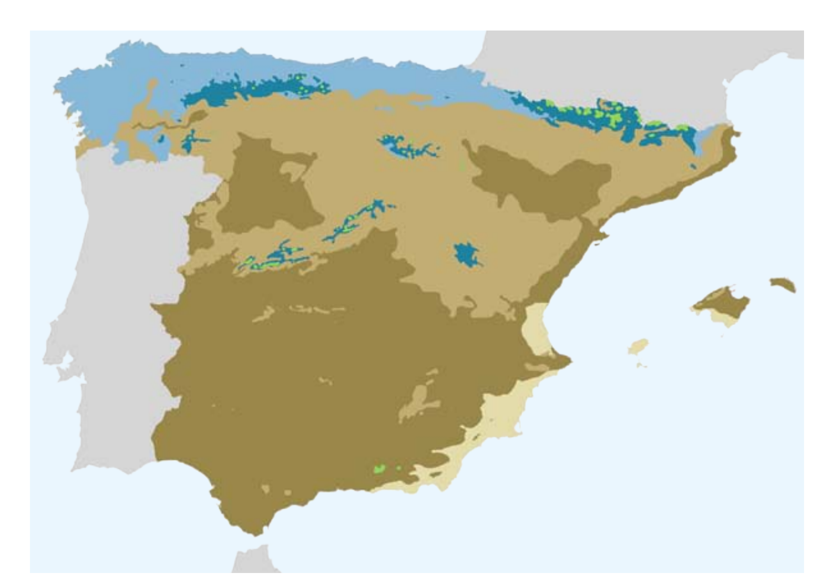
De cara a conseguir ese objetivo, reforestar terrenos baldíos o improductivos parece a primera vista una política adecuada. Pero en España, especialmente en las zonas húmedas, quizá no sea siempre la opción más efectiva. Después de una plantación, pueden necesitarse varias décadas para que se produzca una ganancia neta de carbono, y aún más para que este quede retenido en el suelo de forma estable.

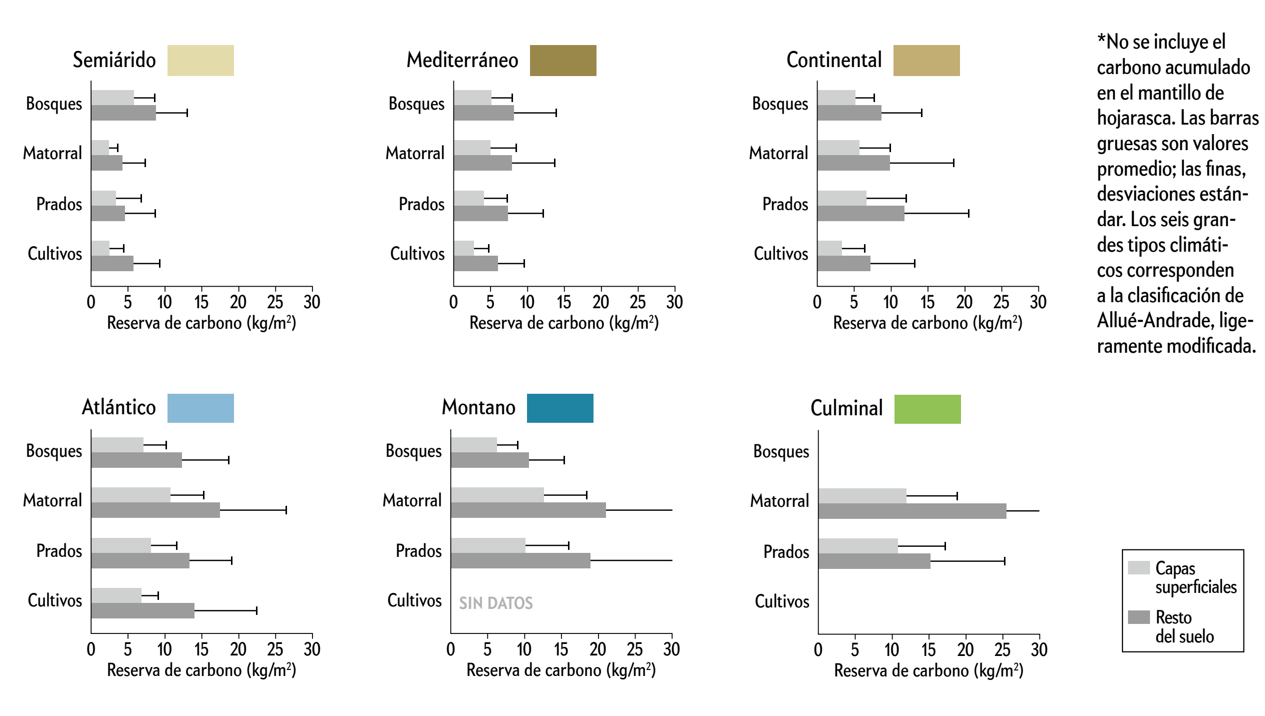
El mantillo de hojarasca del suelo representa un secuestro neto de carbono y tarda menos en formarse tras la reforestación. Sin embargo, es frágil y puede perderse con facilidad.

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DEL AUTOR

¿Cuánto carbono almacenan nuestros suelos?

En España, la reserva de carbono de los suelos es, en promedio, de unos 8 kilogramos por metro cuadrado. Las capas más superficiales, hasta los 25 centímetros de profundidad, almacenan proporcionalmente más carbono que el resto del suelo, hasta los 100 centímetros. Los valores varían mucho de un lugar a otro (*gráficas**). Dos factores resultan determinantes en esta variabilidad: el tipo de vegetación y la zona climática. Los suelos de las zonas secas (semiárida y mediterránea) suelen ser los más pobres en carbono. Los de zonas húmedas son ricos; pero en ellas los suelos forestales almacenan más carbono, en promedio, que los suelos bajo prado o matorral. También llama la atención que los suelos agrícolas no siempre son los más pobres.





*No se incluye el carbono acumulado en el mantillo de hojarasca. Las barras gruesas son valores promedio; las finas, desviaciones estándar. Los seis grandes tipos climáticos corresponden a la clasificación de Allué-Andrade, ligeramente modificada.

DATOS RECOPILADOS POR EL AUTOR

de zonas forestadas en terrenos agrícolas; la pérdida suele ser del orden del 40 por ciento de la reserva de carbono original, pero puede superar el 50 por ciento.

Estas pérdidas nos indican que la reserva de carbono edáfico es frágil. Como veremos a continuación, hay que esperar que una parte de ella se pierda debido al cambio climático. Ello contribuirá al incremento de CO_2 atmosférico, empeorando aún más la situación. Frente a esta perspectiva, se impone en todo el mundo la necesidad de trabajar activamente en el sentido contrario: aumentar la reserva de carbono de los suelos.

Una proporción relevante del carbono de la atmósfera estuvo una vez en el suelo. Y podría volver a él, al menos en parte, si gestionamos el suelo adecuadamente. De hecho, debería volver a él; entre otras razones porque, dejando de lado la cuestión del cambio climático, la pérdida alarmante de fertilidad de los suelos agrícolas a escala mundial se debe, en gran parte, a la disminución generalizada de su contenido en materia orgánica [*véase* «¿Podremos salvar los suelos?», por Ramón Vallejo; Investigación y Ciencia, junio de 2015].

La consciencia sobre tales problemas subyace a las políticas que se proponen de favorecer el secuestro de carbono en el suelo. En el caso de los suelos agrícolas, hay un repertorio de prácticas que darían este resultado, como la incorporación sistemática de enmiendas y abonos orgánicos, estiércol, compost o residuos

de cosechas. También es necesario cambiar la mentalidad de muchos agricultores, que aplican de modo automático algunos métodos, cuanto menos, dudosos. Así, en algunos tipos de cultivo (viña, olivo), la obsesión por despojar el suelo de cualquier cubierta que no sea la de la propia planta cultivada tiene efectos perversos sobre su contenido de carbono, porque elimina una fuente de alimentación importante (las raíces de tales plantas) y deja el suelo desnudo y expuesto a la radiación solar.

El Ministerio de Agricultura, Agroalimentación y Bosques de Francia ha lanzado recientemente un objetivo para mitigar el cambio climático en las próximas décadas: el reto del 4 por mil. Presentado en la conferencia *Our common future under climate change* («Nuestro futuro común bajo el cambio climático»), celebrada en julio de 2015 en París, con él se pretende aumentar la reserva mundial de carbono en los suelos un cuatro por mil, o un 0,4 por ciento, cada año. Parece un objetivo muy modesto. Pero si aceptamos la estimación antes mencionada de 1600 petagramos de carbono edáfico en todo el mundo, incrementar esta cantidad un cuatro por mil significa secuestrar en el suelo unos 6,4 petagramos de carbono, una cifra que corresponde aproximadamente a las emisiones anuales de carbono a la atmósfera. Por tanto, esta iniciativa es, en realidad, ambiciosa.

Queda por ver, lógicamente, si es posible.

LOS SUELOS DE ESPAÑA

Para saber si los suelos de nuestro país pueden contribuir a retirar carbono de la atmósfera, debemos conocer primero cuál es su contenido actual de carbono. El punto de partida para estimar la reserva de carbono a escala local, regional o estatal consiste en disponer de una buena base de perfiles. En edafología, un perfil es un corte vertical del suelo realizado in situ, generalmente con una pala, hasta llegar al sustrato rocoso sobre el que se asienta el suelo. A continuación se describen las características morfológicas de las distintas capas observadas (llamadas «horizontes»), de las que se toman muestras para analizar en el laboratorio. Por supuesto, el dato crucial para nosotros es el contenido de carbono de las distintas capas.

Varios estudios han cuantificado el carbono almacenado en los suelos de España. Juan C. Rodríguez Murillo, del Museo Nacional de Ciencias Naturales, en Madrid, publicó en 2001 la primera estimación de la reserva total de carbono en los suelos de España: 3,7 petagramos de carbono, con un contenido medio de 7,59 kilogramos de carbono por metro cuadrado. Estimaciones posteriores han dado resultados parecidos, por lo que el valor real no debe andar muy lejos de esa cifra. Así, Enrique Doblas Miranda, del Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales, en Barcelona, y sus colaboradores calculaban en 2013 que los suelos no agrícolas de España (bosques, prados, matorrales) acumulan 2,54 petagramos de carbono hasta un metro de profundidad, lo que corresponde a una media de unos 8,7 kilogramos de carbono por metro cuadrado. Teniendo en cuenta que ese estudio descartaba los suelos agrícolas, que suelen ser los más pobres en carbono, ambos trabajos son muy coincidentes. Un estudio publicado en 2016 por José A. Rodríguez-Martín, del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria en Madrid, y sus colaboradores, ha dado un resultado inferior, de unos 2,8 petagramos. La diferencia resulta menos relevante de lo que podría parecer: en el último estudio solo se consideraron los 30 centímetros más superficiales del suelo, mientras que en los anteriores se valoraba el perfil entero o hasta un metro de profundidad, límite típico para muchos de estos trabajos.

Con el fin de profundizar en el efecto del uso del suelo sobre la reserva de carbono en los suelos de España, el autor de este artículo ha recopilado y examinado los datos de estudios publicados en revistas españolas a lo largo de las últimas décadas, así como de trabajos inéditos, informes encargados por administraciones varias, estudios puntuales de alcance regional o provincial, etcétera. Los datos que se presentan a continuación corresponden a la España peninsular y las islas Baleares (las Canarias, con ecosisistemas muy distintos, no se han incluido) y, salvo que se mencione lo contrario, los valores se refieren a kilogramos de carbono por metro cuadrado, hasta un metro de profundidad.

La información recopilada depara algunas sorpresas. Por ejemplo, el hecho de que los suelos forestales no son particularmente ricos en carbono, con 9,75 kilogramos por metro cuadrado en promedio. La reserva de carbono bajo matorrales y prados es superior, de 11,52 y 13,50 kilogramos, respectivamente. Hay que recalcar la consistencia de este resultado, que se mantiene para todos los tipos de bosque considerados (planifolios, coníferas, bosques mixtos...).

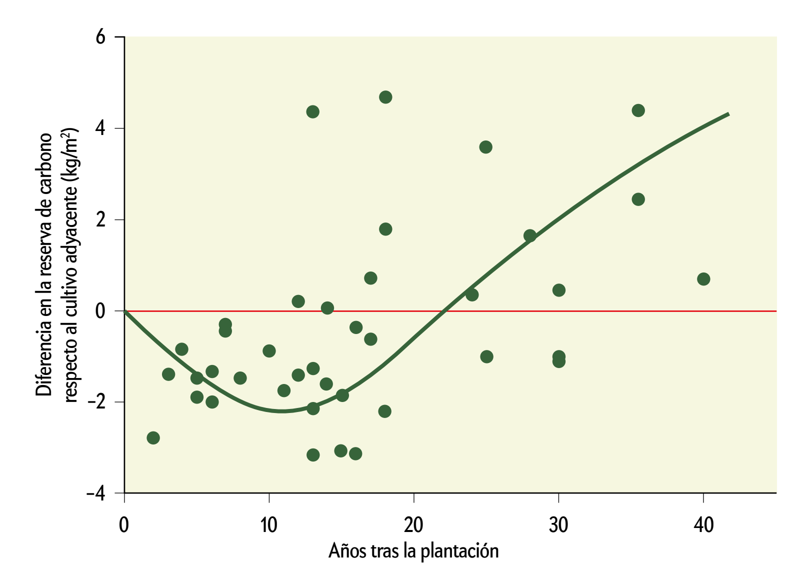
Los datos pueden presentarse también desde otra perspectiva: el clima. Consideremos las seis grandes áreas del territorio español basadas en la clasificación fitoclimática de Allué-Andrade. Cada una de estas áreas corresponde a un tipo climático bien delimitado: semiárido, mediterráneo litoral (en lo sucesivo, mediterráneo a secas), mediterráneo continental (en lo sucesivo, continental a secas), atlántico, montano (zonas ubicadas en laderas de grandes macizos montañosos) y culminal (zonas culminales de alta montaña; ocupan un porcentaje ínfimo del territorio). Al explorar los datos de carbono edáfico en estas grandes áreas observamos que la reserva de carbono aumenta al pasar de las zonas más áridas a las más húmedas, desde los 5,40 kilogramos por metro cuadrado en la zona semiárida hasta los 16,23 en las zonas culminales. Si bien, como cabía esperar, la variabilidad de los datos dentro de cada área es enorme.

Teniendo en cuenta que la reserva de carbono resulta inferior en las zonas secas que en las húmedas, es lógico pensar que si el clima se vuelve más árido (con un aumento de las temperaturas y una disminución de las precipitaciones) se producirá un descenso en la cantidad de carbono almacenado. Uno de los efectos esperados del cambio climático es, precisamente, una pérdida generalizada de carbono en los suelos de España. Para mitigar ese efecto podemos aplicar prácticas que den lugar a un aumento de la reserva de carbono, sin perder de vista que, por así decirlo, el cambio climático empuja en sentido opuesto.

Si combinamos tipo de vegetación y zona climática, observamos que las zonas más secas (semiárida y mediterránea) son las únicas en las que los suelos forestales son los más ricos en carbono; en la España húmeda estos ocupan el segundo o el tercer lugar. Que los bosques se sitúen en muchos casos por detrás de los prados, en lo que a reserva de carbono edáfico se refiere, era algo esperable: después de todo, los suelos pratenses tienen la reputación de ser los más ricos en carbono, a escala mundial. Más relevante es el hecho de que en algunas zonas, por ejemplo la atlántica, las mayores reservas de carbono edáfico se produzcan bajo matorral. Este es un resultado incómodo, porque el matorral es visto a menudo como un tipo de vegetación improductivo, en comparación con los demás tipos de vegetación, más útiles económicamente.

Otro resultado notable es que, si contabilizamos la reserva de carbono hasta un metro de profundidad, observamos que los suelos agrícolas no siempre son los más pobres. De hecho,

LA REFORESTACIÓN de una zona previamente cultivada conlleva cambios en el contenido de carbono del suelo, aunque estos no siempre resultan positivos. En parcelas reforestadas con *Pinus radiata*, cerca de Lugo (*fotografía*), durante los primeros años se produce una pérdida neta de carbono. Deben transcurrir dos decenios o más para que el balance resulte positivo. (Los datos corresponden a la diferencia en el contenido de carbono en los primeros 30 centímetros de suelo mineral entre pares de parcelas, una reforestada y la otra mantenida en cultivo.)





FUENTE: «CAPTURA DE C EN TERRENOS AGRÍCOLAS REFORESTADOS CON *PINUS RADIATA* EN EL NORTE DE ESPAÑA». C. PÉREZ CRUZADO ET AL. EN *LA CAPTURA DE CARBONO EN ECOSISTEMAS TERRESTRES IBEROAMERICANOS*, DIRIGIDO POR J. F. GALLARDO LANCHO, PÁGS. 195-212, 2007 (*gráfica*); AGUSTÍN MERINO (*zona reforestada*)

en algunas zonas estos suelos contienen más carbono que los ocupados por bosques. Este resultado puede sorprender al lego en edafología, pero no es del todo inesperado: los suelos agrícolas son los mejores, por la sencilla razón de que desde tiempo inmemorial se han escogido para cultivar los terrenos más profundos, menos pedregosos y con texturas más favorables al crecimiento de las plantas; en tanto que los usos menos productivos (matorrales, bosques) han quedado relegados a zonas con suelos poco profundos, fisurales o demasiado pedregosos. La capacidad de acumulación de carbono de un suelo está limitada por su profundidad (cuanto más profundo, mayor capacidad) y por su pedregosidad (a mayor pedregosidad, menor volumen útil y menor capacidad). Y los suelos agrícolas suelen ser los más profundos y los menos pedregosos. Así, aun cuando los suelos agrícolas suelen tener la concentración de carbono más baja, en ellos la reserva total de carbono puede ser notable.

Hay otro factor de extrema importancia que debe tenerse en cuenta: la distribución del carbono en profundidad. Al pasear por cualquier bosque, la observación de un mantillo de hojarasca grueso y esponjoso puede sugerir que bajo el arbolado yace una cantidad enorme de materia orgánica. Y no es así, o no necesariamente. El contenido de carbono orgánico disminuye con rapidez en profundidad: este descenso es muy acusado en los suelos forestales, lo es menos bajo otros tipos de vegetación, como prados o matorrales, y todavía menos en los suelos agrícolas, donde el contenido de carbono resulta bastante homogéneo a lo largo del perfil. La consecuencia es que, mientras que las capas superficiales de los suelos forestales acumulan mucho más carbono que las de los suelos agrícolas, ello no siempre puede extrapolarse al perfil entero.

Sin embargo, si nos centramos en lo que sucede en los primeros 25 centímetros, las cosas parecen volver a su lugar. El efecto distorsionante de la diferente profundidad del suelo desaparece, y el efecto de cada tipo de vegetación se muestra con mayor claridad. Los suelos que almacenan menos carbono en los primeros 25 centímetros son los agrícolas, mientras que los forestales son los que más almacenan. Por consiguiente, reforestar suelos agrícolas abandonados tiene sentido.

Pero reforestar zonas ocupadas por prados o matorrales es algo bien distinto. Hoy día muchos pastizales son abandonados debido a la progresiva desaparición de la ganadería extensiva, y en muchas partes del mundo, entre ellas España, resulta frecuente la progresiva invasión de los pastizales por formaciones arbustivas. En cuanto a los matorrales, su utilidad es a menudo dudosa para los propietarios. Por tanto, tiene cierta lógica que muchos de ellos se planteen reforestar estas zonas, porque al fin y al cabo, la madera es un artículo de valor. Pero si el objetivo consiste en secuestrar carbono en el suelo (de cara a cumplir con los compromisos internacionales de mitigación del cambio climático, por ejemplo), reforestar prados y matorrales abandonados no es la mejor opción necesariamente. En particular en la España húmeda.

EL EFECTO DE LA REFORESTACIÓN

Lo dicho anteriormente indica que, a pesar de todo, de cara a secuestrar carbono en el suelo, repoblar con bosques los suelos agrícolas que se abandonan sigue teniendo sentido, especialmente en las zonas semiáridas y mediterráneas. La apuesta parece clara: repoblamos un cultivo abandonado con, pongamos por caso, un pinar, y el suelo acumulará carbono. Pero no resulta tan sencillo. En realidad, a menudo durante los primeros años el suelo perderá carbono.

El fenómeno tiene nombre. Se trata de la curva de Covington, un término algo inapropiado, porque su descubridor, el ecólogo William W. Covington, de la Universidad del Norte de Arizona, lo describió solo en la capas de hojarasca superficial en un

artículo ya clásico publicado en 1981. En concreto, observó que tras una tala estas capas pierden grosor (y materia total) debido a su descomposición progresiva y a la ausencia de entradas nuevas. El fenómeno al que nos referimos tiene más calado, porque de hecho puede afectar también al suelo mineral (es decir, la parte del suelo dominada por materia mineral, que queda debajo del mantillo de hojarasca).

Un ejemplo interesante de ello en España lo ofrecen los estudios realizados por el equipo de Agustín Merino, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes de Lugo, y centrados en las repoblaciones de pino insigne (*Pinus radiata*) sobre cultivos abandonados en las comarcas cercanas a Lugo. En la investigación se comparó el carbono edáfico de plantaciones de pino de edad creciente con el de una zona adyacente dedicada al cultivo. Los resultados revelaron que, en los primeros diez años tras la plantación, el contenido de carbono del suelo era siempre inferior al del suelo agrícola. En la década posterior empezaban a aparecer algunos casos en que el contenido de carbono era superior bajo la plantación, y a partir de los veinte años esto sucedía ya en la mayoría de los casos. Así, en estas plantaciones parecen bastar unos veinte o veinticinco años para que la reforestación suponga una ganancia neta de carbono, en comparación con el cultivo adyacente.

No siempre se encuentran ejemplos tan diáfanos como el mencionado: la variabilidad espacial, la complejidad en el relieve de las zonas repobladas o los cambios en la litología (que se traducen en cambios en las características del suelo) pueden hacer difícil detectar tendencias coherentes como la mostrada. Citando a Ramon Margalef, la complejidad de la naturaleza es tan apasionante como, a veces, exasperante. Sin embargo, parece claro que los primeros años tras la repoblación son críticos para el balance de carbono: en ellos se da un riesgo elevado de que el secuestro sea negativo. Comprender el origen del problema puede ser clave para aminorarlo o incluso evitarlo.

LOS PRIMEROS AÑOS

Cuando el establecimiento de una plantación forestal va acompañado de trabajos de preparación del terreno que incluyan roturación, subsolado y, en general, cualquier agresión física seria al suelo, la pérdida de carbono puede darse por hecha. Este tipo de actividades tienen un efecto destructivo importante sobre la estructuración del suelo en agregados, responsables en gran parte de la estabilización del carbono. Que la repoblación se realice reduciendo al mínimo el impacto físico sobre el suelo es, pues, crucial. El uso de maquinaria pesada en la preparación del terreno debería evitarse. Ello reviste especial importancia cuando la zona que se reforesta no es una parcela agrícola abandonada, sino un área de vegetación quizá no muy interesante desde un punto de vista económico (eriales, matorrales), pero que puede almacenar una cantidad de carbono considerable: en este caso la pérdida puede ser superior a lo que el bosque será capaz de secuestrar en décadas.

Aun cuando se eviten las agresiones físicas al terreno, es muy probable que se produzcan pérdidas de carbono edáfico. Si antes de la repoblación el suelo se hallaba cubierto por algún tipo de vegetación, como plantas herbáceas o matorral bajo, es posible que tras los trabajos de plantación una parte del suelo pierda esta vegetación protectora y quede expuesto a la atmósfera y a la radiación solar. En estas condiciones puede esperarse un aumento de la actividad microbiana en el suelo, con la consiguiente descomposición de la materia orgánica y pérdida de carbono.

Ambos problemas son evitables solo en parte. Pueden diseñarse métodos de plantación que obvien en lo posible el uso de maquinaria pesada, pero es inevitable la frecuentación de la parcela por los operarios que llevan a cabo los trabajos. En zonas con pendientes acusadas, esta simple frecuentación causa una agresión importante a la superficie del suelo, lo que se traducirá en pérdidas importantes de carbono. En cualquier caso, el objetivo debe ser evitar en lo posible la pérdida de cubierta vegetal herbácea o arbustiva; y, cuando esta se produzca, promover su pronta recuperación.

De cara a sortear tales problemas, el sueño de cualquier ecólogo empeñado en favorecer el secuestro de carbono en el suelo no son las plantaciones, sino los bosques subespontáneos, sobre todo los que se desarrollan en zonas cultivadas antiguamente. Cuando la parcela agrícola en desuso se sitúa al lado de un bosque natural, no será difícil que este invada el terreno que se le ofrece. En tal caso, la recolonización no implicará ningún tipo de trabajo físico humano sobre el terreno, por lo que la perturbación será escasa o nula y el secuestro de carbono se podrá desarrollar casi sin trabas.

Sin embargo, incluso en esa situación ideal también puede darse una pérdida inicial de carbono en el suelo. Como ejemplo, ofrecemos los datos obtenidos por el autor en un bosque subespontáneo de la comarca barcelonesa del Bages. El bosque, un pinar de *Pinus nigra* formado en una parcela de cultivo abandonada hace unos treinta años, es aún claramente joven e inmaduro. Su contenido de carbono en la superficie del suelo es superior al del cultivo adyacente. Sin embargo, a medida que nos adentramos en el suelo, la situación se invierte: por debajo de los diez centímetros la concentración de carbono es superior en la parcela agrícola. Y lo es también la cantidad de carbono acumulada en los primeros treinta centímetros del suelo mineral. En este ejemplo, pues, el efecto de los primeros años tras la recolonización del cultivo abandonado por el pinar ha sido una redistribución vertical del carbono en el perfil, sin cambios significativos en la reserva de carbono en el suelo mineral.

Esta es, sin embargo, una visión incompleta. Porque hemos obviado una parte muy característica de los suelos forestales: el mantillo de hojarasca, del que hablamos a continuación.

HOJARASCA Y RAÍCES

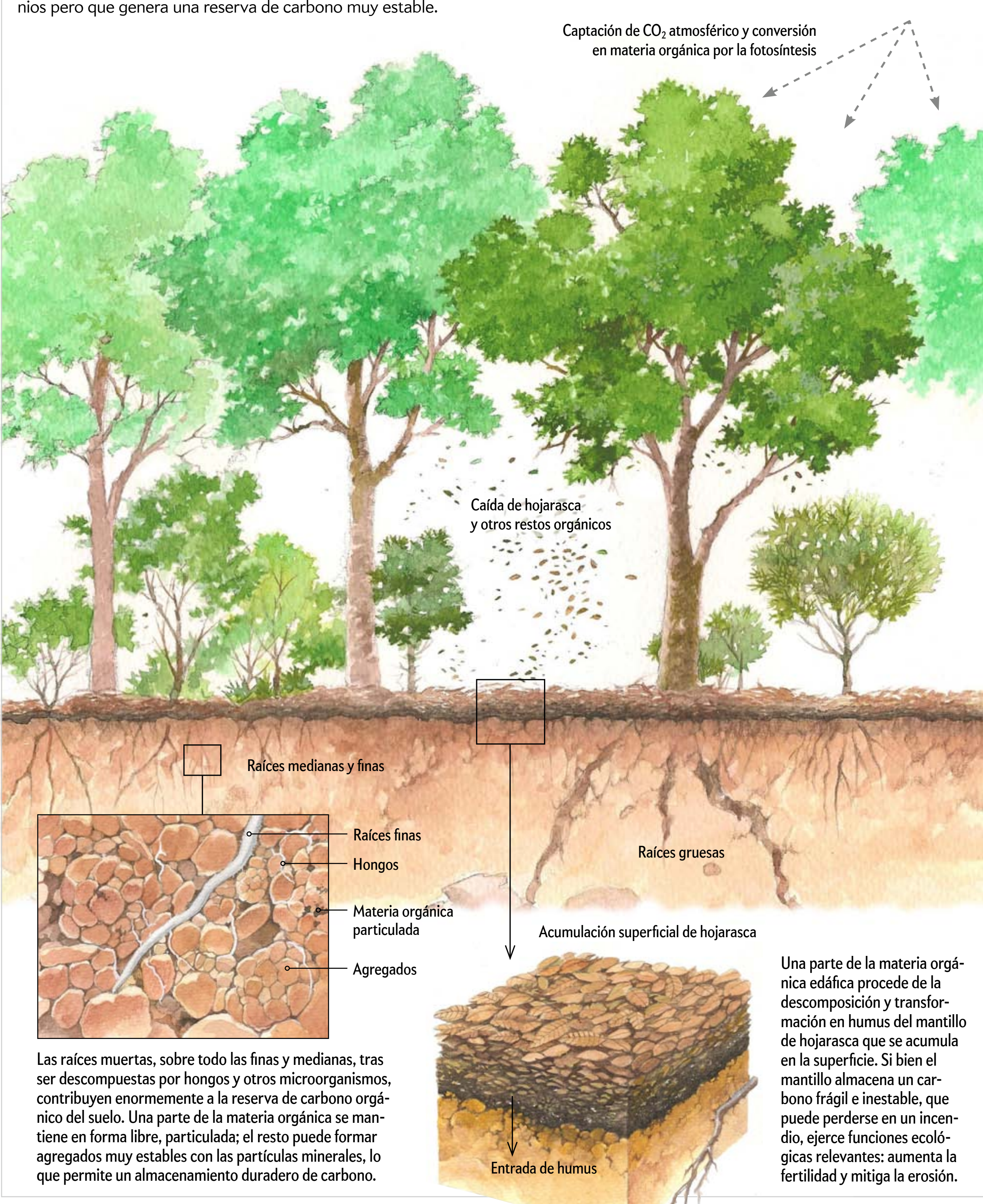
El mantillo de hojarasca, muy visible en los bosques, pero menos evidente en otros tipos de vegetación —en particular, prados— e inexistente en los suelos agrícolas —salvo aquellos sometidos a agricultura sin labranza—, da una personalidad muy especial a los suelos forestales. Ejerce una enorme influencia en la capa más superficial del suelo mineral, que los edafólogos denominan horizonte A_1, y que en los suelos forestales suele ser muy rico en carbono orgánico.

Pero, según ya hemos comentado, la reserva de carbono en estos suelos suele ser inferior a la que cabría suponer. Ello se debe a que el contenido de carbono en ellos desciende en profundidad más rápidamente que en los de otros tipos de vegetación. La fuente principal de ese carbono no es la hojarasca, como se podría pensar. Tal era la idea que se ofrecía en algunos tratados clásicos de edafología, que en las décadas de los setenta y los ochenta dedicaban capítulos enteros a resaltar el efecto de factores como la calidad de la hojarasca sobre la cantidad y las características de la materia orgánica almacenada en el suelo mineral. Conceptos como «hojarasca mejorante» u «hojarasca acidificante» se hicieron populares entre los estudiosos del hu-

UN ALMACÉN DE CARBONO

De la atmósfera al suelo

Los suelos presentan una elevada capacidad de almacenar carbono en forma de materia orgánica, por lo que pueden contribuir a reducir el exceso de dióxido de carbono de la atmósfera. Las plantas captan el carbono de este gas y, a través de la fotosíntesis, lo incorporan a sus estructuras vegetales (hojas, ramas, raíces, etcétera), que, al morir, se incorporan al suelo. Los restos vegetales se descomponen, se transforman en humus y se incorporan al suelo mineral subyacente, un proceso que puede tardar siglos o milenios pero que genera una reserva de carbono muy estable.



Las raíces muertas, sobre todo las finas y medianas, tras ser descompuestas por hongos y otros microorganismos, contribuyen enormemente a la reserva de carbono orgánico del suelo. Una parte de la materia orgánica se mantiene en forma libre, particulada; el resto puede formar agregados muy estables con las partículas minerales, lo que permite un almacenamiento duradero de carbono.

Una parte de la materia orgánica edáfica procede de la descomposición y transformación en humus del mantillo de hojarasca que se acumula en la superficie. Si bien el mantillo almacena un carbono frágil e inestable, que puede perderse en un incendio, ejerce funciones ecológicas relevantes: aumenta la fertilidad y mitiga la erosión.

PERE ROVIRA

LA COLONIZACIÓN de las zonas agrícolas por bosques no conlleva necesariamente una ganancia de carbono a corto plazo. Se ilustra el ejemplo de dos parcelas adyacentes estudiadas cerca de Cardona, en la comarca barcelonesa del Bages, una dedicada al cultivo (*izquierda*) y la otra ocupada por un pinar subespontáneo de *Pinus nigra* de treinta años de edad (*derecha*). El suelo de este último almacena en conjunto menos carbono que el agrícola, aunque contenga más en las capas superficiales (*tabla*).





CORTESÍA DEL AUTOR

mus, e incluso entre algunos grupos ecologistas que convirtieron las pináceas en el «coco» de la ecología forestal. Sin renegar de los conocimientos acumulados durante aquellos años, hoy día parece bien establecido que son las raíces la fuente principal de materia orgánica para el suelo mineral. El papel de la hojarasca sería más bien secundario.

Ello tiene varias consecuencias. De entrada, la preocupación por si la hojarasca es «mejorante» o «acidificante» pierde algo de su relevancia. Pero, además, implica que la acumulación de grandes cantidades de carbono edáfico no estará relacionada con la formación de gruesos mantillos de hojarasca, sino con la producción de tupidos sistemas de raíces. La riqueza de materia orgánica en los suelos bajo pastizal suele atribuirse precisamente a la abundancia de raíces y al hecho de que se distribuyen de forma relativamente homogénea hasta una profundidad considerable. Tales sistemas son esperables también en matorrales o pastizales densos, pero no —o mucho menos— en un bosque maduro, donde el cierre de las copas disminuye la llegada de luz al suelo y dificulta el desarrollo de un sotobosque denso.

Bajo un bosque maduro, los pies de cualquier visitante pueden llegar a hundirse decenas de centímetros en gruesos mantillos de hojas muertas, progresivamente ennegrecidas y humificadas a medida que se acercan a la superficie del suelo mineral. En bosques boreales, estos mantillos de hojarasca pueden tener un grosor notable (de un metro o más) y representar la mayor parte de la reserva total de carbono del suelo. Por el contrario, en nuestras latitudes suelen suponer menos del 10 por ciento del total. Sin embargo, representan una entrada neta de carbono al suelo, en relación con el suelo agrícola original, desprovisto de mantillo. Y, sobre todo, constituyen un secuestro cuantificable: el incremento temporal de la cantidad de carbono en la hojarasca es mucho más fácil de medir que los cambios en el contenido de carbono del suelo mineral, que pueden quedar enmascarados por la variabilidad espacial, a menudo enorme. Es, además, un secuestro rápido: mientras que en el suelo mineral la reserva de carbono necesita siglos para llegar a su nivel máximo, en el mantillo de hojarasca este nivel máximo a menudo se consigue al cabo de tres a cuatro décadas. La facilidad de cuantificar este secuestro neto de carbono en el suelo ha hecho de la acumulación de hojarasca un tema del gusto de muchos edafólogos.

	Reserva de carbono (kg/m²)	
Profundidad	Cultivo	Bosque
De 0 a 5 cm	0,85 ± 0,29	1,45 ± 0,18
De 5 a 15 cm	1,80 ± 0,08	1,28 ± 0,17
De 15 a 30 cm	2,12 ± 0,48	1,48 ± 0,43
Total acumulado	4,77 ± 0,60	4,20 ± 0,47

Sin embargo, el carbono secuestrado en la hojarasca es, también, frágil. Se descompone (y se transforma en CO_2) más deprisa que el del suelo mineral y, un detalle importante, suele perderse por completo cuando se produce un incendio. Resulta, por tanto, doblemente vulnerable. Los incendios forestales, incluidos los prescritos (incendios suaves que se realizan de forma deliberada y controlada para disminuir el sotobosque y reducir el riesgo de incendios incontrolables en verano) suelen destruir la capa de hojarasca, en tanto que el carbono ubicado en el suelo mineral apenas se ve afectado, al menos de forma inmediata.

EL FACTOR TIEMPO

Queda por mencionar un último factor que influye en el secuestro de carbono: el tiempo. En unos cincuenta años, si el lugar es apropiado (suelo profundo, pluviosidad adecuada, buena insolación), un pinar puede haber crecido lo bastante para ofrecer al visitante un aspecto espléndido. Pero el suelo tiene su propia dinámica, mucho más lenta: cincuenta años son pocos para que se desarrolle un perfil maduro de materia orgánica. La acumulación de una cantidad importante de carbono en el suelo no es cuestión de décadas, sino de siglos. Demasiado tiempo para la mayoría de los gestores del territorio de hoy en día.

Así, en una zona de bosque que se tala y a continuación se replanta (una práctica habitual en los bosques gestionados) suele producirse una pérdida de carbono edáfico. Esta pérdida va recuperándose con el tiempo, pero pueden necesitarse décadas para que la reserva de carbono alcance el nivel anterior a la tala. Si el ciclo de corta es inferior a este lapso de tiempo, el resultado a largo plazo será una pérdida de carbono generalizada, en lugar del secuestro neto que se deseaba.

Además, es impensable que el secuestro de carbono en el suelo se convierta en la única razón para reforestar zonas impro-

ductivas: cualquier propietario deseará lógicamente sacar algún beneficio de sus bosques. Por tanto, si el bosque es productivo probablemente se someterá a alguna tala, entresaca u otro tipo de explotación (como la extracción de biomasa para usos de calefacción, actividad potenciada desde algunos ámbitos), lo que puede dar lugar también a pérdidas de carbono en el suelo.

El carbono incorporado al suelo mineral tras la plantación no solo resulta difícil de cuantificar, sino que además es frágil, ya que puede perderse con bastante facilidad. Ello no solo es debido a que el bosque será frecuentado y parcialmente aprovechado, aun antes de ser talado. También es debido a que el carbono que haya sido secuestrado tras la plantación (la reserva nueva de carbono) suele ser menos estable que el preexistente en el suelo agrícola. Hay varias razones de esta menor estabilidad. En primer lugar, se trata de un carbono más joven, menos humificado que el preexistente; asimismo, por ser reciente, ha tenido poco tiempo para asociarse a arcillas y formas libres de hierro o aluminio, capaces de estabilizar la materia orgánica a muy largo plazo.

La fragilidad del carbono recién secuestrado en el suelo, de una antigüedad inferior a un siglo, parece, pues, inevitable. Las grandes reservas de carbono de los suelos forestales antiguos y maduros no son el resultado de unas pocas décadas de captar, humificar y estabilizar hojarasca y raíces muertas, sino el punto final de una evolución de siglos o incluso milenios. Visto desde esta perspectiva, muchos de los actuales suelos forestales de España se hallan aún en la infancia, y la vulnerabilidad de sus reservas de carbono, relativamente recientes, recuerda mucho la de la salud de los niños de un parvulario.

EPPUR SI MUOVE

Pero se mueve. La frase se atribuye, probablemente de forma apócrifa, a Galileo en el momento de retractarse de sus teorías ante el tribunal eclesiástico que lo amenazaba con la hoguera. La Tierra se movía, a pesar de todo. Y, en muchos países del mundo, los suelos bajo bosques o plantaciones forestales jóvenes siguen secuestrando carbono. A pesar de todo.

En este artículo hemos expuesto una serie de hechos que deben tenerse en cuenta a la hora de valorar las reforestaciones. La intención es resaltar que no son una panacea a la que haya que confiar toda una política de mitigación del cambio climático. Pero ello no significa que reforestar sea un error, en especial cuando hablamos de reforestar cultivos abandonados, y muy especialmente en la España seca (zonas mediterráneas y semiáridas). Que los incrementos esperables en la reserva de carbono edáfico a menudo no resulten espectaculares no significa que sean irrelevantes.

Ecológicamente hablando, los resultados serán positivos en numerosos aspectos. A corto plazo, reforestar un cultivo abandonado —y mejor aún, permitir la recuperación espontánea del bosque cuando hay un bosque adyacente que lo facilite— aumentará la concentración de carbono en la capa más superficial del suelo y lo cubrirá con un mantillo de hojarasca. La combinación de ambos fenómenos es un antídoto excelente contra la erosión, al que habrá que añadir la acción protectora de las copas, cuando la plantación o el bosque subespontáneo haya llegado a cierto desarrollo. Más allá del freno de la erosión, hay que recordar la estrecha relación entre fertilidad del suelo y contenido de materia orgánica. La materia orgánica aumenta la retención de nutrientes (en especial los que se hallan en forma catiónica: amonio, potasio, calcio), y en sí misma es un gran contenedor de nutrientes (en especial, nitrógeno y fósforo). También aumenta la capacidad de retención de agua, regula el *p*H, y, en conjunto, facilita la creación en el suelo de un microambiente favorable a la actividad microbiana.

Queda un punto final para la discusión. Es la cuestión de si la reforestación es el único destino deseable para una parcela agrícola abandonada. Un bosque es un ecosistema costoso, en términos hídricos. La proliferación de bosques afecta al ciclo del agua a escala regional, porque aumenta sobremanera la evapotranspiración (la pérdida de agua debida a la evaporación y a la transpiración de las plantas). La disminución actual de los caudales de agua continentales (torrentes, riachuelos, manantiales) puede ser síntoma de un cambio climático ya en curso, pero para muchos está relacionada con la proliferación masiva de bosques en nuestro país, plantados o subespontáneos. Este problema, junto con la necesidad de mantener una heterogeneidad paisajística, clave para el mantenimiento de la biodiversidad, podría llevar a sopesar la conveniencia, en algunos casos, de no reforestar. Máxime cuando, como hemos visto, en amplias zonas de España los suelos de prados y matorrales parecen secuestrar mejor el carbono que los de bosques, sean naturales o plantados.

Esta cuestión daría lugar a un debate muy amplio que escapa al ámbito de este artículo: el uso social del territorio, para que cumpla las funciones que se esperan de él. Estas funciones van más allá del mero secuestro de carbono. A medida que una sociedad se desarrolla, espera de su territorio algo más que producir: desea lugares de recreo, deporte, solaz paisajístico, mantenimiento de la biodiversidad y un etcétera tan largo como la imaginación del lector. Y cada uno de estos usos tendrá un efecto particular sobre la reserva de carbono edáfico, no necesariamente positivo. Parafraseando la sentencia célebre mencionada en el clásico film de Orson Welles *Ciudadano Kane*, secuestrar mucho carbono en el suelo no es difícil; a condición de que el único objetivo previsto para el suelo sea precisamente secuestrar carbono. Ello no sucederá nunca. Quizá sea este el principal reto al que se deberá enfrentar la ya famosa iniciativa del cuatro por mil. IyC

PARA SABER MÁS

Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. J. C. Rodríguez Murillo en *Biology & Fertility of Soils*, vol. 33, págs. 53-61, 2001.

Captura de C en terrenos agrícolas reforestados con *Pinus radiata* en el norte de España. C. Pérez Cruzado et al. en *La captura de carbono en ecosistemas terrestres iberoamericanos*, dirigido por J. F. Gallardo Lancho, págs. 195-212, 2007.

An appraisal of soil organic C content in Mediterranean agricultural soils. J. Romanyà y P. Rovira en *Soil Use and Management*, vol. 27, págs. 321-332, 2011.

Soil carbon stocks and their variability across the forests, shrublands and grasslands of peninsular Spain. E. Doblas Miranda et al. en *Biogeosciences*, vol. 10, págs. 8353-8361, 2013.

Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. J. A. Rodríguez Martín et al. en *Geoderma*, vol. 264, págs. 117-125, 2016.

Soil carbon 4 per mille. B. Minasny et al., en *Geoderma*, vol. 292, págs. 59-86, 2017.

Enlace a la página web del Ministerio de Agricultura francés, en que se expone la iniciativa cuatro por mil: **http://agriculture.gouv.fr/rejoignez-linitiative-4-pour-1000**

EN NUESTRO ARCHIVO

El humus. Juan F. Gallardo en *IyC*, julio de 1980.



CARDIOLOGÍA

Terapia génica para el corazón

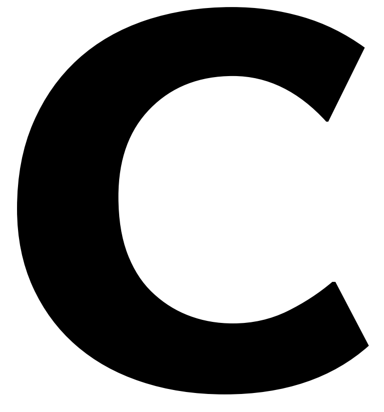
Aprovechar la capacidad curativa de este órgano podría ayudar a prevenir infartos de miocardio y a reducir el dolor derivado del estrechamiento de las arterias coronarias

Gabor Rubanyi

HARRY CAMPBELL

Gabor Rubanyi es médico y cofundador de Angionetics, una compañía que está desarrollando una terapia génica para promover la formación de vasos nuevos en el corazón.





Cada día, el corazón humano late más de 100.000 veces y bombea casi 9000 litros de sangre oxigenada al resto del cuerpo a través de la aorta. Un 5 por ciento de este flujo se desvía a dos vasos fundamentales, las arterias coronarias, que conducen la sangre por una red de vasos más pequeños y capilares que nutren y oxigenan cada fibra del músculo cardíaco, o miocardio.

Cuando un coágulo de sangre o una placa de ateroma (cúmulo de grasa en las paredes de las arterias) interrumpen la circulación de los vasos coronarios en uno o más puntos, las células cardíacas adyacentes a la obstrucción quedan privadas de oxígeno y nutrientes. Si no se restaura pronto el flujo, estas células mueren y el paciente sufre un infarto de miocardio. Dependiendo de la extensión del daño, el corazón deja de funcionar normalmente e incluso puede pararse y provocar la muerte.

Las células miocárdicas no mueren de inmediato cuando carecen de oxígeno, por lo que la mayoría de ellas podrán salvarse si el paciente llega a tiempo al hospital para que los médicos actúen antes de que se produzcan daños irreversibles. Intentarán mantener abiertas las arterias estenosadas (estrechadas) mediante un estent o realizarán un baipás quirúrgico de la sección obstruida de la arteria. Estos procedimientos también se emplean de forma preventiva para evitar infartos de miocardio y aliviar la angina de pecho, el dolor que suele asociarse al estrechamiento de las arterias. Sin embargo, no siempre funcionan y pueden ocasionar complicaciones.

El corazón tiene su propia manera de enfrentarse a la obstrucción de las arterias coronarias. Desarrolla nuevos canales, llamados vasos colaterales, que redirigen el flujo sanguíneo desde otros puntos hacia las zonas del miocardio privadas de oxígeno. Tales vasos existen desde el nacimiento, pero normalmente no transportan sangre. Crecen e incluso pueden formarse *de novo* tras una obstrucción o estrechamiento graves de las arterias coronarias, si bien solo después de algunas semanas. Un sistema de vasos colaterales bien desarrollado puede llegar a suministrar suficiente sangre oxigenada como para mantener el corazón bien nutrido incluso en situaciones de estenosis completa del vaso coronario. Sin embargo, la circulación colateral natural no siempre funciona con tanta eficacia.

Durante las últimas dos décadas, un grupo de investigadores, entre los que me incluyo, hemos buscado formas para inducir la producción de nuevos vasos colaterales que tengan la capacidad de aportar sangre al corazón de aquellos pacientes cuyas fibras musculares no reciben suficiente oxígeno. El objetivo es reducir el dolor que sienten numerosas personas con ateroesclerosis avanzada, además de prevenir infartos de miocardio en aquellas que ya no pueden mejorar con un estent o un baipás. Las pruebas realizadas hasta ahora, que han consistido en inyectar en el corazón diversas proteínas, genes y células, no han dado los frutos esperados y aún no tenemos una solución aceptable para la mayoría de los enfermos críticos. Sin embargo, en los últimos años hemos refinado de forma extraordinaria nuestras técnicas. Varias de ellas ya se están poniendo a prueba en ensayos humanos que finalizarán en un futuro no muy lejano.

Si tenemos éxito, los primeros beneficiados serán los que sufren una angina. Esta se manifiesta en situaciones de estrés o cuando se practica ejercicio físico, debido a que las arterias coronarias dañadas por la ateroesclerosis no pueden aportar el oxígeno necesario al tejido cardíaco. Por varias razones, los tratamientos habituales (medicación, colocación de un estent o cirugía de baipás) no ejercen efecto en los varios millones de personas del mundo que padecen angina de pecho (de las cuales cerca de 850.000 viven en EE.UU.). Un tratamiento innovador que les aliviara los síntomas mejoraría enormemente su calidad de vida. Podrían salir a dar un paseo por su barrio, en lugar de tener que permanecer encerrados en casa. También contribuiría a evitar un infarto de miocardio en al menos una pequeña proporción de estas personas.

FORMACIÓN DE VASOS COLATERALES

Para diseñar un tratamiento que estimule la formación de nuevos vasos en el corazón, primero hay que conocer por qué en ocasiones se desarrolla de manera espontánea el sistema de circulación colateral. Durante años se ha debatido acerca de qué estímulo lleva a los vasos colaterales existentes a convertirse en arterias de calibre mediano. ¿Es el aumento de flujo sanguíneo

EN SÍNTESIS

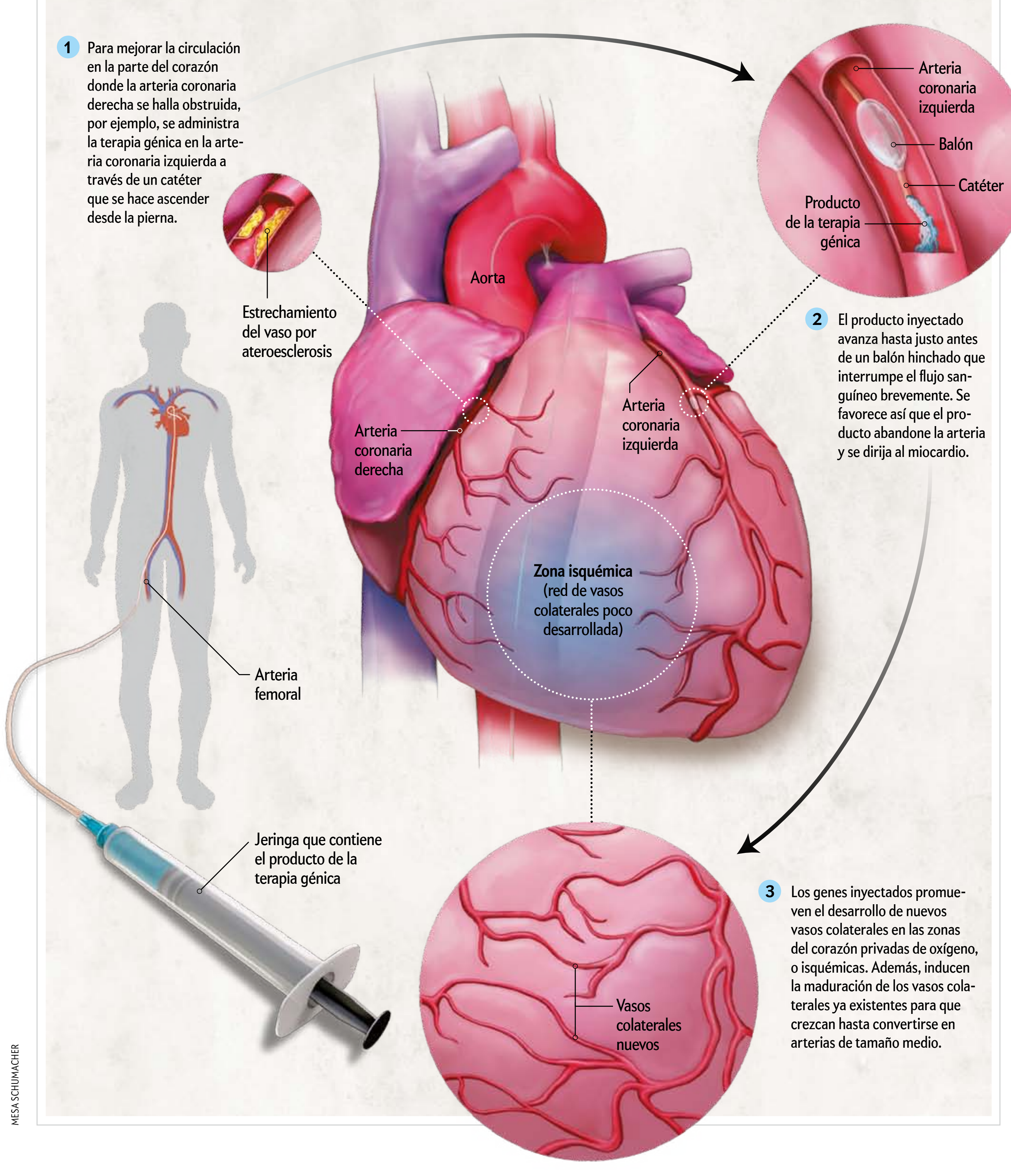
El corazón tiene la capacidad de desarrollar nuevos vasos cuando se lo fuerza a ello. Es la llamada circulación colateral, y puede suponer la diferencia entre la vida y la muerte tras un infarto de miocardio, puesto que aporta sangre a las partes afectadas del músculo cardíaco.

Sin embargo, por motivos aún desconocidos, la mayor parte de los afectados por una cardiopatía no pueden desarrollar una circulación colateral adecuada.

Se está investigando el empleo de terapias génicas y celulares para promover la formación de vasos colaterales. Si tienen éxito, estos tratamientos podrían ayudar a evitar las anginas de pecho o incluso los infartos de miocardio.

Vasos nuevos para un corazón en apuros

En determinadas circunstancias el corazón puede generar nuevas arterias. Se están ensayando terapias génicas para estimular esa capacidad regenerativa. El objetivo consiste en restaurar el flujo sanguíneo en las zonas del miocardio donde la circulación se ha visto mermada debido a la acumulación de grasa (placas de ateroma) en uno o más vasos coronarios principales. De tener éxito, estos tratamientos podrían usarse en el futuro para aliviar el dolor torácico que aparece cuando una parte del corazón no recibe la oxigenación adecuada (isquemia).



MESA SCHUMACHER

por dichos vasos? ¿O son las bajas concentraciones de oxígeno en el miocardio afectado? Ambas situaciones se producen cuando la luz de una arteria se reduce mucho. La presión vascular justo después del estrechamiento disminuye porque el flujo de sangre que atraviesa ese punto es menor. Tal disminución provoca un desequilibrio que favorece el desvío de la corriente sanguínea desde las zonas del corazón no afectadas hacia los vasos colaterales. Al mismo tiempo, el tejido cardíaco más allá del punto de obstrucción arterial recibe menos oxígeno porque le llega menos sangre. Algunos estudios respaldaban más la hipótesis del aumento de flujo sanguíneo, mientras que otros apoyaban más la teoría de la hipoxia.

Parece que ambos fenómenos desempeñan un papel relevante en el desarrollo de la circulación colateral en el corazón humano. El flujo sanguíneo que atraviesa los vasos secundarios produce fuerzas de cizallamiento en sus paredes internas y estas, como consecuencia, liberan factores de crecimiento, unas proteínas que aumentan el diámetro interno de los vasos y fortalecen sus paredes. De esta manera, los nuevos vasos pueden acoger un mayor flujo sanguíneo. Por otro lado, la falta de oxígeno en el miocardio estimula la liberación de otros factores de crecimiento que desencadenan la formación de nuevos vasos colaterales, los cuales se convertirán en arterias pequeñas. En los últimos quince años, se ha comprobado que solo entre un 20 y un 30 por ciento de los pacientes con cardiopatía presentan un sistema de vasos colaterales bien desarrollado. Se desconoce la razón, pero en la mayoría de las personas con cardiopatía coronaria la circulación colateral no es suficiente para suplir la función de las arterias obstruidas. Se postula que los niveles elevados de colesterol y el daño causado a los vasos pequeños en patologías como la diabetes pueden interferir con la capacidad de maduración de estos vasos.

Un tratamiento nuevo que aliviara los síntomas de la angina de pecho (dolor torácico) mejoraría sobremanera la calidad de vida de muchos pacientes, que podrían salir a pasear en lugar de verse obligados a permanecer en casa

Un buen sistema de circulación colateral puede suponer la diferencia entre la vida y la muerte. En 2013, el grupo de Christian Seiler, del Hospital Universitario de Berna, publicó en línea un estudio en el que participaron 845 personas con cardiopatía grave. En él se demostraba que los pacientes cuya circulación colateral lograba restablecer al menos el 25 por ciento del flujo coronario presentaban, en los siguientes diez años, un 67 por ciento menos de posibilidades de fallecer a causa de problemas de corazón.

RETOS CIENTÍFICOS

Las investigaciones llevadas a cabo en los últimos años han revelado un único modo de estimular la circulación colateral: el ejercicio físico. Este obliga al corazón a funcionar a un ritmo mayor del habitual durante un período largo de tiempo. Un estudio alemán publicado en 2016 en el que participaron 60 varones con cardiopatía coronaria grave demostró que un programa semanal de 10 horas de ejercicios de alta intensidad o 15 horas de ejercicios de intensidad moderada, durante un mes, aumentaba un 40 por ciento la cantidad de flujo sanguíneo en la circulación colateral. El grupo de actividad moderada realizaba ejercicio de seis a ocho veces al día, a un 60 por ciento de su capacidad (siendo el 100 por ciento el esfuerzo máximo que podían hacer sin sufrir dolor torácico). El grupo de actividad intensa practicaba ejercicio cuatro veces al día a un 95 por ciento de su capacidad máxima (un nivel en el que algunos padecían dolor torácico), siempre bajo la supervisión de un equipo especializado de entrenadores personales y médicos. El 40 por ciento de mejoría probablemente se corresponda con el máximo teórico de lo que es fisiológicamente posible, según indican los estudios de laboratorio con perros, en los que la circulación colateral puede suplir hasta un tercio de la normal.

La hipótesis es que la actividad física incrementa la presión en las arterias coronarias de los pacientes, lo que desvía la sangre hacia los vasos colaterales. El ejercicio diario lleva a las paredes a ensancharse y engrosarse para poder albergar más sangre. Se desconoce si también induce la formación de nuevos vasos colaterales. De ser así, serían al principio muy pequeños y no podrían detectarse en un angiograma (un tipo de prueba de rayos X empleada para ver las arterias coronarias). [*Véase* «Adaptación cardíaca al ejercicio físico», por Marta Sitges y Josep Brugada; Investigación y Ciencia, febrero de 2014.]

Sin embargo, a numerosos pacientes con cardiopatía avanzada no puede indicárseles un programa de ejercicios, ni siquiera de intensidad moderada. De ahí la búsqueda de una combinación ideal de proteínas, genes o células que estimulen la expansión de la red de vasos colaterales del corazón.

Los primeros esfuerzos se centraron en dos proteínas, conocidas por sus acrónimos VEGF y FGF, que estimulan el crecimiento de vasos sanguíneos. Varios estudios pequeños con estas y otras moléculas ofrecieron resultados prometedores, pero ensayos posteriores con un mayor número de pacientes detectaron una serie de complicaciones. El problema fundamental era que los médicos tenían que administrar dosis muy elevadas de estas proteínas durante períodos prolongados para lograr un crecimiento mínimo de vasos en el corazón. A su vez, el sistema circulatorio en otras partes del cuerpo reaccionaba mal a estas dosis, y se producía un descenso de la presión arterial, a veces grave, por lo que estos tratamientos experimentales tuvieron que ser suspendidos.

Para intentar solventar estos problemas, algunos investigadores recurrieron a la terapia génica. La idea consiste en inyectar en el corazón genes que contienen las instrucciones moleculares para la producción in situ de VEGF, FGF y otras proteínas. Para ello, se introducen dichos genes en virus relativamente inocuos que infectan a las células cardíacas. Una vez implantados con éxito, estos genes producen los factores de crecimiento necesa-

rios durante largos períodos de tiempo justo donde se necesitan. Los científicos han logrado inducir la creación y maduración de nuevos vasos colaterales en corazones de animales de laboratorio, pero no hay ningún ensayo clínico a gran escala que haya demostrado que la terapia génica ejerza beneficios notables en corazones humanos. Tal vez se deba a que los genes inyectados no alcanzan suficientes células miocárdicas. Debo revelar en este punto que Angionetics, mi compañía, está intentando desarrollar uno de estos tratamientos basado en el gen que codifica la molécula FGF. Hemos identificado un método que podría hacer llegar el material genético con mayor eficacia a un área más extensa del corazón, lo cual resulta fundamental para la formación de nuevos vasos colaterales. La Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense nos dio luz verde en septiembre de 2016 para iniciar estudios avanzados con nuestro producto en 320 pacientes.

Por último, algunos investigadores se han decantado por el uso de células madre adultas, extraídas de la médula ósea o de la sangre del propio paciente, para empujar al corazón enfermo a generar nuevos vasos sanguíneos. La idea se basa en el hecho de que las células madre tienen la capacidad de producir una gran variedad de factores de crecimiento, y es muy posible que se necesiten múltiples factores, y en combinaciones muy precisas, para generar el número adecuado de vasos colaterales. Una de las dificultades radica en identificar cuántas células de las inyectadas siguen funcionando en el corazón. A pesar de ello, varios ensayos pequeños llevados a cabo en los últimos diez años han obtenido resultados prometedores, como haber logrado que los pacientes tratados puedan realizar ejercicio en un tapiz rodante unos minutos más que los no tratados, sin desencadenar dolor torácico. Pero al igual que las estrategias basadas en proteínas y en genes, hasta ahora la terapia con células madre no ha demostrado ejercer beneficios importantes en ensayos clínicos grandes.

LECCIONES APRENDIDAS

Podría pensarse que veinte años es mucho tiempo dedicado a averiguar el modo de hacer crecer nuevos vasos colaterales en el corazón sin haber hallado una solución realmente eficaz. Pero todo lo que hemos ido aprendiendo en este campo nos reafirma que nuestra idea de estimular la producción de vasos colaterales resulta factible y puede ayudar a muchas personas. Lo que necesitamos ahora es aunar toda la información recabada en los estudios y empezar a aplicarla de forma sistemática en cada nuevo proyecto que nos planteemos.

Hoy, por ejemplo, conocemos mejor cómo administrar el tratamiento para que el corazón responda al máximo de su capacidad. Hasta ahora los científicos aplicaban la terapia con la que experimentaban de alguna de estas tres formas: directamente en el miocardio, desde el que se extendía hacia una zona pequeña entre las fibras; a través de una vena en el corazón, que empujaba la terapia a contracorriente del flujo sanguíneo; o a través de una arteria coronaria, que la transportaba en el mismo sentido que el torrente sanguíneo. Varios estudios han demostrado que la única manera de llegar a las vías colaterales que ya existen y estimular la formación de nuevos vasos consiste en inyectar directamente los fármacos experimentales en una o más arterias coronarias. Los vasos colaterales ya existentes están demasiado lejos para beneficiarse del tratamiento si lo inyectamos en el músculo cardíaco o en las venas. Si además interrumpimos temporalmente la circulación mediante la introducción de un pequeño balón en la arteria, a la vez que inyectamos el fármaco, las paredes de los vasos se vuelven más permeables y permiten la llegada al corazón de una dosis mayor del tratamiento.

Asimismo, un reto importante a la hora de demostrar que un tratamiento da lugar a nuevos vasos colaterales radica en realizar los ensayos clínicos con los pacientes adecuados. Parece obvio que este no aportará un beneficio añadido a ese 20 o 30 por ciento de las personas con cardiopatía que ya presentan una circulación colateral bien desarrollada. Si este tipo de enfermos participa en los ensayos, su falta de respuesta podría enmascarar los posibles efectos positivos en otros pacientes. Así, los resultados globales quedarían alterados y se interpretaría de forma errónea como un fracaso terapéutico.

Hoy por hoy, el método más exacto para medir la circulación colateral de una persona consiste en insertar en la arteria coronaria un pequeño balón a través de un catéter, hinchar el balón para detener la circulación durante un breve tiempo y medir la cantidad de flujo sanguíneo que continúa su trayecto, esquivando la obstrucción, presumiblemente a través de vasos colaterales. En la práctica, tal procedimiento resulta demasiado complejo y caro para identificar a los pacientes que podrían mejorar su red de colaterales, y para verificar después si el tratamiento les ha ayudado. Se han desarrollado nuevas técnicas menos invasivas para estimar la circulación colateral, pero aún no son suficientemente precisas. Necesitamos idear una estrategia sencilla y estandarizada para medir el flujo colateral que nos permita determinar los candidatos que son adecuados para el tratamiento y nos ayude a reconocer si este surte efecto.

Teniendo en cuenta estos aspectos y las lecciones ya aprendidas, creo que estamos en el buen camino para desarrollar un tratamiento que potencie el crecimiento de vasos colaterales en el corazón. En los años venideros, deberíamos poder ofrecer una alternativa adecuada para aquellos pacientes cardiovasculares que hoy no pueden optar a otra solución. IyC

PARA SABER MÁS

The collateral circulation of the heart. Pascal Meier et al. en *BMC Medicine*, vol. 11, art. 143. Publicado en línea el 4 de junio de 2013.

Angiogenic gene therapy for refractory angina. Gabor M. Rubanyi en *Expert Opinion on Biological Therapy*, vol. 16, n.º 3, págs. 303-315, 2015.

Coronary collateral growth induced by physical exercise: Results of the Leipzig EXerCIse training versus MEdical management in patients with stable coronary artery disease (EXCITE) trial. Sven Möbius-Winkler et al. en *Circulation*, vol. 133, n.º 15, págs. 14-38-1448, 12 de abril de 2016.

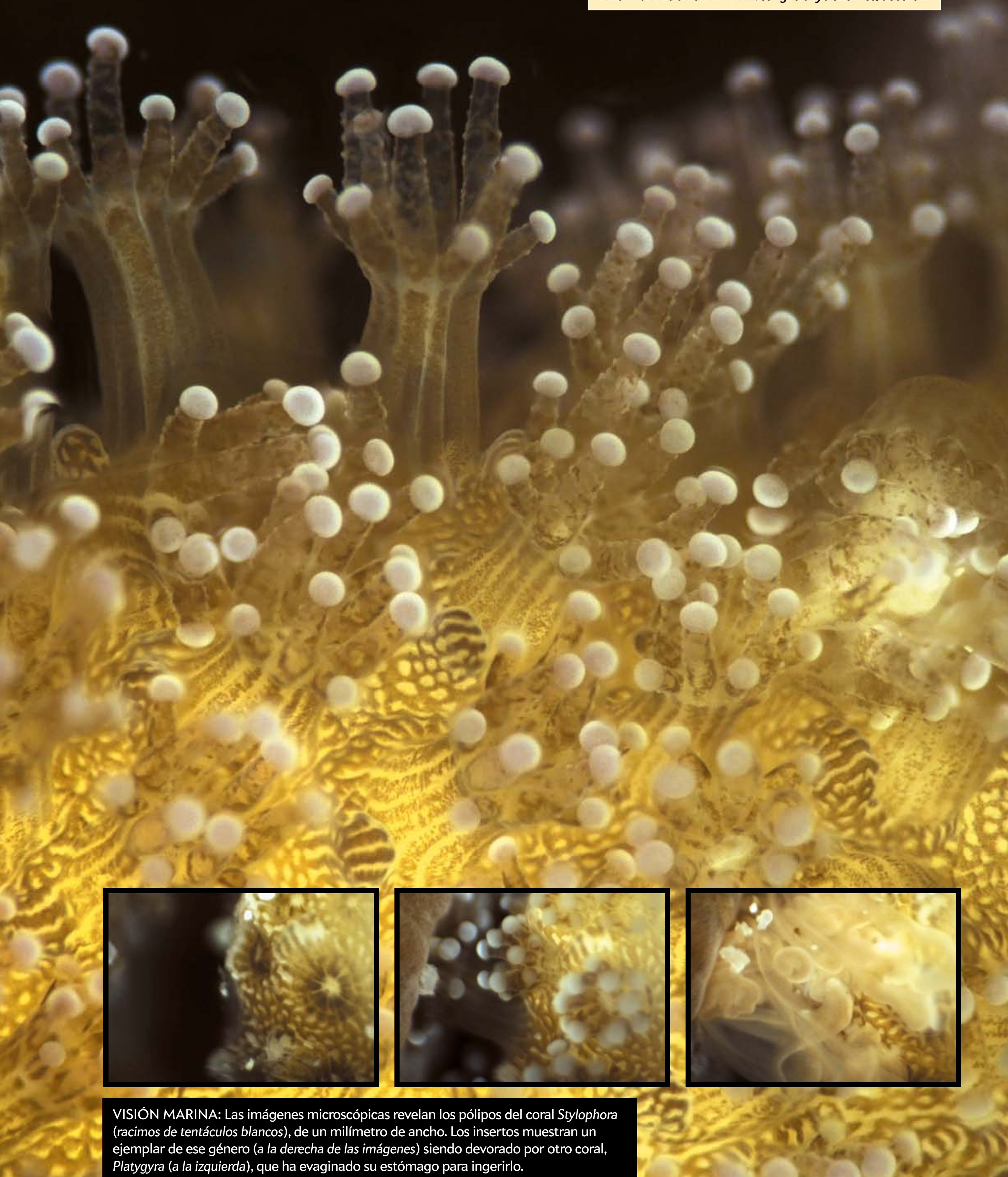
EN NUESTRO ARCHIVO

Angiogénesis terapéutica. Rakesh K. Jain y Peter F. Carmeliet en *IyC*, febrero de 2002.

Terapia génica, segunda parte. Ricki Lewis en *IyC*, mayo de 2014.

por Josh Fischman

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**



VISIÓN MARINA: Las imágenes microscópicas revelan los pólipos del coral *Stylophora* (*racimos de tentáculos blancos*), de un milímetro de ancho. Los insertos muestran un ejemplar de ese género (*a la derecha de las imágenes*) siendo devorado por otro coral, *Platygyra* (*a la izquierda*), que ha evaginado su estómago para ingerirlo.

EL OJO DE LAS PROFUNDIDADES

Un innovador microscopio que permite estudiar el lecho marino está revelando la lucha a vida o muerte que libran los minúsculos pólipos coralinos

En 2015, un equipo científico presenció bajo las aguas del océano Pacífico la lenta pero inexorable danza de la muerte como nunca antes se había visto.

Andrew D. Mullen, estudiante graduado que trabaja con el oceanógrafo Jules Jaffe, del Instituto Scripps de Oceanografía de la Universidad de California en San Diego, estaba inspeccionando un arrecife coralino moribundo próximo a la isla hawaiana de Maui. El arrecife acababa de sufrir el «blanqueo»: las algas simbiontes que viven en cada uno de los diminutos pólipos coralinos no resisten el calor y el coral las expulsa.

Los pólipos palidecen y quedan debilitados, pero vivos. Entonces se cierne sobre ellos la ruina, en forma de filamentos verdes de algas invasoras que vagan a la deriva y se asientan sobre las crestas calcáreas entre los pólipos. Nunca se había observado en condiciones naturales cómo las algas ocupan los intersticios y, con el paso de los meses, se multiplican hasta recubrir los pólipos. Ante ese crecimiento desmedido, el coral no tiene ninguna posibilidad de sobrevivir. Queda cubierto de verdín y muere sin remedio. Toda esa lucha a vida o muerte ocurre en un escenario minúsculo. Cada pólipo tiene alrededor de un milímetro de ancho. Los filamentos de las algas invasoras alcanzan hasta la doceava parte de un milímetro (el grosor de un cabello humano) y las algas simbiontes expulsadas por los corales son unas diez veces mayores. Los investigadores pudieron ver a todos los protagonistas a través de un nuevo tipo de microscopio instalado en una carcasa estanca: el Microscopio Subacuático para la Observación del Bentos, el primer instrumento óptico lo bastante potente como para captar instantáneas microscópicas de la comunidad viviente que tapiza el fondo del mar.

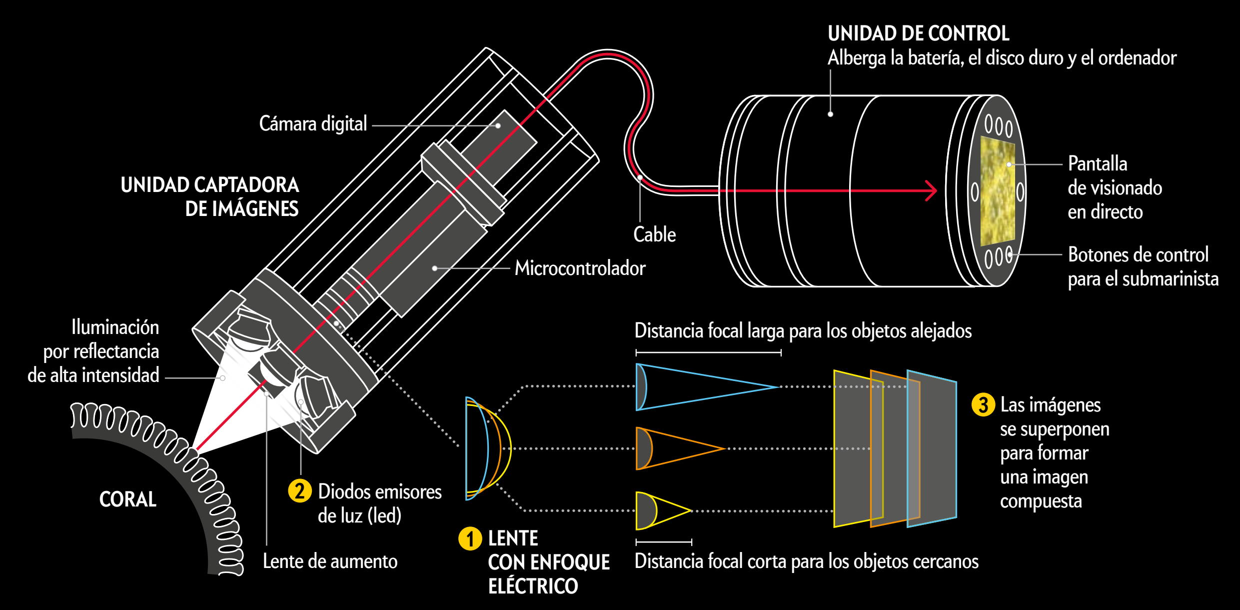
Hasta ahora, Jaffe y otros científicos marinos habían podido observar de cerca los pólipos coralinos, pero solo en el laboratorio. Las condiciones del lecho marino son demasiado tenebrosas y hostiles para que los microscopios clásicos puedan captar imágenes nítidas. Mullen optó por montar varios ledes alrededor del aparato y, para mantener la nitidez de los objetos, instaló lentes con enfoque electrorregulable, provistas de un polímero flexible que se curva o se aplana con rapidez, como el cristalino del ojo.

La lente no solo ha revelado la muerte, sino también las estrategias de supervivencia. Jaffe y Mullen han presenciado, asimismo, la pugna entre los corales por el espacio, en la que uno acaba devorando al otro. Ello no ocurre, empero, cuando ambos pertenecen a la misma especie, lo cual indica que reconocen de algún modo a sus congéneres. No se sabe cómo sucede, pero con esta nueva visión recién adquirida, sin duda los científicos lo descubrirán.

Josh Fischman es editor sénior de *Scientific American*.

Microscopio subacuático

El lecho marino es un anatema para la microscopía. Allí abajo, las aguas oscuras y las corrientes conspiran para convertir cualquier objeto minúsculo en una mancha borrosa y movediza ante la mayoría de las lentes. El singular diseño del Microscopio Subacuático para la Observación del Bentos solventa esas trabas. El elemento clave es una lente que cambia de forma en milisegundos haciéndose más o menos convexa para ajustar la distancia focal y mantener la nitidez de la imagen 1. El instrumento ilumina los objetos con un sistema anular de ledes que emite impulsos de luz inferiores a un milisegundo y brinda exposiciones rápidas, poco alteradas y sin borrosidad 2. La combinación de las exposiciones captadas a diversas distancias focales permite componer una imagen en que todas las partes del objeto quedan enfocadas 3.



CORTESÍA DEL LABORATORIO DE JAFFE DEL INSTITUTO SCRIPPS DE OCEANOGRAFÍA, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, SAN DIEGO (*fotografías*); JOHN GRIMWADE (*ilustración*); FUENTE: «UNDERWATER MICROSCOPY FOR IN SITU STUDIES OF BENTHIC ECOSYSTEMS», POR ANDREW D. MULLEN ET AL., EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 7, ART. N.º 12.093. PUBLICADO EN LÍNEA EL 12 DE JULIO DE 2016

por Alfredo Marcos

Alfredo Marcos es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid.



La filosofía de la biología en el siglo XXI

Un campo en auge y con una gran diversificación temática

La filosofía de la biología es la parte de la filosofía que reflexiona sobre las ciencias de la vida. Fue cultivada en un inicio por Aristóteles. El investigador griego suele tenerse por el padre de la biología, pero también «merece ser considerado —afirma James G. Lennox, experto en ciencia aristotélica de la Universidad de Pittsburgh— el primer filósofo de la biología, y uno de los más grandes». Y no se trata de una mera coincidencia. La reflexión filosófica favoreció, ya en tiempos de Aristóteles, la conversión de una serie de saberes empíricos sobre los vivientes en una auténtica ciencia, con sus propios objetivos y métodos, con un cuerpo articulado de teorías y conceptos.

Lo más notable de la labor de Aristóteles es que supera el interés histórico. Según Lennox, es razonable el intento de construir hoy día una filosofía de la biología de corte aristotélico, basada en conceptos como los de organismo, desarrollo, diferencia, forma y función. Y ello podría hacerse compatible con una visión evolucionista. Ahora bien, la filosofía de la biología de Aristóteles nunca cuajó en una disciplina institucionalizada. David L. Hull, quien fuera profesor emérito de filosofía de la biología en la Universidad Noroccidental (EE.UU.), afirmaba que «la mayor falta de Aristóteles fue la de producir un sistema de conocimiento que era demasiado bueno demasiado pronto (*too good too soon*)».

Fue a partir de los años setenta del siglo pasado cuando la filosofía de la biología empezó a constituirse como un campo académico propio. Los factores que impulsaron este proceso fueron básicamente cuatro. Primero, el extraordinario crecimiento de la biología como ciencia, con el asentamiento de la teoría sintética de la evolución y el descubrimiento de las bases moleculares de la vida. Segundo, la decadencia del neopositivismo y, con ello, la renuncia al proyecto de reducir todas las ciencias a la física. Tercero, la voluntad de algunos biólogos evolutivos, como Ernst Mayr y Francisco Ayala, de proteger la autonomía de la biología. Y cuarto, el interés de algunos filósofos, como Michael Ruse, de la Universidad estatal de Florida, y Hull, en promover su programa darwinista.

Esos factores contribuyeron a que la filosofía de la biología focalizase sus debates en torno a dos temas: el darwinismo y el reduccionismo. El abordaje de los mismos requería el trabajo conjunto de filósofos y biólogos. Por un lado estaban los filósofos que, como Ruse, entendían el darwinismo como la respuesta a las principales preguntas filosóficas. Por otro, los biólogos evolutivos, cuyas investigaciones se veían amenazadas por el ascenso fulgurante de la biología de laboratorio, que acaparaba cada vez más financiación y recursos humanos. Estos no tenían una agenda filosófica explícita, pero sí estaban interesados en la defensa de la biología como una ciencia autónoma, no reductible a la bioquímica. De las sinergias entre estas dos tradiciones nació la filosofía de la biología institucionalizada, con sus congresos, revistas, asociaciones y cátedras.

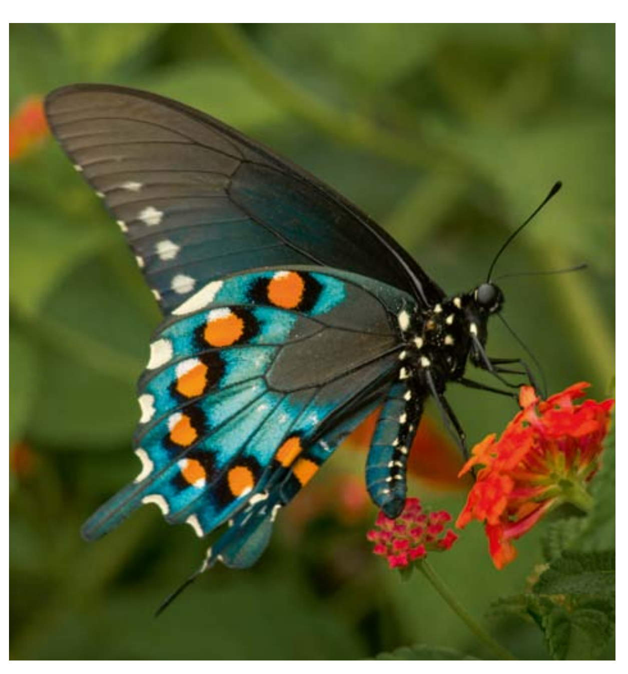
Hacia finales del siglo pasado, los dos debates principales daban ya signos de agotamiento. Se llegó a aceptar el darwinismo como paisaje teórico de fondo para la biología, pero también se constató la necesidad de suplementar la teoría darwinista con otras teorías que diesen cuenta de diversos aspectos del hecho evolutivo, el cual ha resultado ser mucho más complejo de lo que se presumía. Así, cuando se habla de la «teoría sintética de la evolución» se hace referencia a un cuerpo teórico surgido de la síntesis del darwinismo con la genética, pero también a uno necesitado siempre de nuevas operaciones de extensión o síntesis (con la teoría del origen de la vida, la de la especiación, la neutralista, la de los equilibrios puntuados, la termodinámica de sistemas alejados del equilibrio, las teorías informacionales, la biología del desarrollo, la biología sistémica, etcétera). En cada una de dichas operaciones se producen tensiones dignas de estudio por parte de biólogos y filósofos. Por ejemplo, cuando se quiere dar cuenta de la evolución en el nivel molecular, se tiene que admitir que no todos los rasgos de un viviente se hallan sometidos a selección; cuando se quiere dar cuenta de los ritmos evolutivos en el nivel macro, hay que reconsiderar el componente gradualista del darwinismo; y así sucesivamente.

En cuanto a la cuestión del reduccionismo, puede decirse que presentaba dos caras. Por un lado, se cuestionaba si la biología puede ser reducida a la física; por otro, si las humanidades pueden ser reducidas a la biología. Los biólogos evolutivos estaban especialmente interesados en el reconocimiento de la biología como ciencia autónoma respecto de la física, mientras que los filósofos darwinistas lo estaban en la reducción de las humanidades a la cosmovisión darwinista.

En el debate sobre la reducción de la biología a la física se vislumbran ciertos consensos. Para empezar, la filosofía de la biología actual aboga por el pluralismo metodológico, donde se combinan e integran métodos reductivos y compositivos. Asimismo, reconoce que se puede dar la reducción epistemológica a pequeña escala, entre teorías muy próximas, pero que la reducción a gran escala de la biología a la física es inviable. Por último, en lo ontológico prefiere la búsqueda de terceras vías entre mecanicismo y vitalismo, siendo, quizás, el organicismo una de las más prometedoras.

Sobre la posible reducción de las humanidades a la biología, en cambio, no existe consenso; se ha quebrado la ortodoxia naturalista vigente en la filosofía de la biología del siglo pasado. El debate está abierto y solo el tiempo nos dirá qué rumbo toma.

Gracias a esos debates, la filosofía de la biología llegó a ser una disciplina consolidada a finales del siglo pasado. En paralelo, la biología siguió creciendo a buen ritmo; se convirtió en una ciencia central, casi paradigmática, con una gran repercusión social. Ello ha impulsado el crecimiento de la filosofía de la biología, que, en el siglo xxi, se ha ido ampliando en cuanto a los temas abordados, las perspectivas adoptadas, las tradiciones inspiradoras, la procedencia de los investigadores y los idiomas de comunicación. Como consecuencia, ha evitado el peligro de estancamiento al que se asomaba y ha entrado casi en simbiosis con otras áreas como la filosofía de la naturaleza, la filosofía de la medicina, la bioética o la ética ambiental.



Más allá del darwinismo, han aparecido cuestiones nuevas relativas a campos muy variados de la biología. «La situación de predominio casi absoluto de la teoría de la evolución en la filosofía de la biología —afirma el catedrático de filosofía de la ciencia de la Universidad de Málaga Antonio Diéguez— está comenzando a cambiar en los últimos años». La filosofía de la biología actual sigue rememorando las cuestiones darwinistas, pero la parte más dinámica de la investigación discurre ya por otros derroteros.

Una de las áreas de estudio más activas desde los años noventa es la biología evolutiva del desarrollo (evo-devo). Es también una de las más atractivas para la filosofía de la biología. Las alas de una mariposa, por ejemplo, presentan ciertos colores como fruto de un largo proceso evolutivo, pero también como fruto de un proceso de desarrollo ontogenético inmediato y pautado. ¿Qué conexión existe entre estos dos tipos de explicaciones? La evo-devo estudia la relación entre ontogénesis y filogénesis. Por una parte, las pautas de desarrollo de los organismos evolucionan; por otra, los procesos de desarrollo, con sus particulares constricciones, modulan la evolución.

Y, en conexión con los estudios del desarrollo, existen otros campos de la biología contemporánea que ofrecen asimismo motivos de reflexión filosófica, como la diferenciación celular y sus patologías o la manipulación de células madre.

La teoría general de sistemas también se ha incorporado a la explicación de los seres vivos, que son vistos como sistemas informacionales autoorganizados. Aquí las nociones de «sistema» y de «información» suscitan el debate filosófico. Hay que pensar si son realmente aplicables a los vivientes. Para algunos autores, la idea de que la vida constituye un proceso informacional es mera metáfora; otros, en cambio, entienden que la perspectiva sistémica e informacional dota a la biología sistémica de una gran potencia explicativa. El punto de vista sistémico, por otra parte, no es ajeno al actual desarrollo de la bioinformática y de las ciencias «ómicas», que obtienen y procesan cantidades ingentes de datos sobre los sistemas vivos. Esta tendencia de la biología contemporánea tampoco ha pasado inadvertida para la filosofía de la biología.

Otro núcleo de cuestiones que despierta un interés filosófico creciente es el de la artificialización de la vida. Por un lado, se producen artefactos informáticos y robóticos que simulan funciones vitales. Por otro, existe ya la posibilidad de manipulación profunda de los vivientes. Todo ello abre oportunidades prometedoras y también presenta serios riesgos. Quizás el programa más ambicioso en este campo sea el de la biología sintética, que se propone el diseño y construcción de nuevos seres vivos, con los interrogantes ontológicos, éticos y políticos que ello suscita.

Los textos más recientes de filosofía de la biología también dedican capítulos a la reflexión sobre otras muchas zonas de las ciencias de la vida, pues en todas ellas detectan cuestiones ontológicas, epistemológicas y prácticas de gran calado. Por poner solo unos pocos ejemplos: se atiende, por supuesto, a la biología molecular, a la biología celular y a la fisiología, pero también a la inmunología y su conexión con la individualidad de los organismos; a la etología, que nos invita a pensar sobre las bases biológicas del conocimiento, la moral y el sentido estético; a la ecología, que nos lleva a reflexionar sobre la biodiversidad, su naturaleza y valor, y que conecta ya la filosofía de la biología inexorablemente con la ética ambiental; a las neurociencias, que han puesto sobre la mesa numerosos problemas relacionados con la naturaleza humana, y a la biomedicina, donde filosofía de la biología y bioética se dan la mano.

En suma, la filosofía de la biología del siglo xxi se parece menos a una escuela filosófica cerrada y más a un campo de investigación con fronteras difusas, abierto a numerosas tradiciones, enfoques y temas. Y todo parece indicar que estas tendencias seguirán vigentes en el futuro inmediato. IyC

PARA SABER MÁS

Tomándose a Darwin en serio. Michael Ruse, Salvat, 1987.

Aristotle's philosophy of biology. James Lennox, Cambridge University Press, 2001.

The history of the philosophy of biology. David Hull, en *The Oxford Handbook of Philosophy of Biology*, Oxford University Press, 2008.

La vida bajo escrutinio: una introducción a la filosofía de la biología. Antonio Diéguez, Biblioteca Buridán, 2012.

Philosophy of biology. A companion for educators. Kostas Kampourakis, Springer, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Repensar a Darwin. Telmo Pievani en *IyC*, enero de 2016.

por Aaron M. Ellison

Aaron M. Ellison es investigador de ecología en la Universidad Harvard e inspector de conservación en Royalston, Massachusetts.



Cómo defender la biodiversidad

Si deseamos proteger las especies en vías de extinción, los ecólogos debemos hacer valer nuestra voz en los círculos políticos

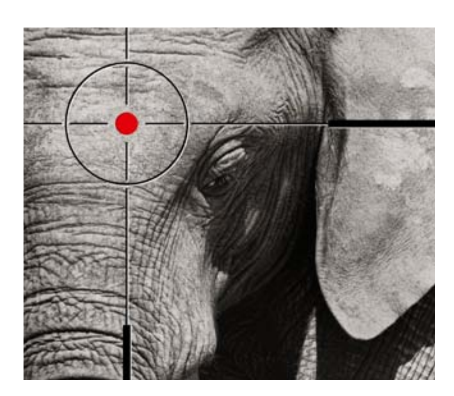
¿Cómo podemos los científicos proteger la biodiversidad? A raíz del gran censo de elefantes del pasado agosto, que reveló su descenso en picado en toda África, se sucedieron los habituales llamamientos de los investigadores reclamando más y mejores datos. Solo si sabemos dónde y cuántos individuos de una especie hay, reza el argumento, tendremos alguna posibilidad de conservarla. Una idea equivocada, a mi entender.

No por ser mejores los datos salvarán a los elefantes ni a ninguna otra especie. Desde hace décadas, numerosas personas, instituciones académicas, Gobiernos y organizaciones diversas recaban y organizan datos mientras nuestro legado biológico va menguando.

Nadie duda de que los datos sean importantes. Permiten plantear prioridades y reclamar la atención en torno a las especies en peligro. Pero raramente impulsan la toma de decisiones en el ámbito de la conservación. En la inmensa mayoría de los casos, se destinan a sustentar decisiones tomadas por otros motivos. Las que adoptó la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES) el pasado octubre para endurecer el comercio de tiburones, loros y pangolines así lo demuestran. La fascinación, el carisma y el aspecto enternecedor cautivaron a los delegados, y la presión periodística y política y las campañas en los medios sociales condicionaron las decisiones.

La reunión científica mundial que celebró poco después la Red de Investigación Ecológica Internacional a Largo Plazo (ILTER, por sus siglas en inglés) en el Parque Nacional Kruger, en Sudáfrica, puso de manifiesto el problema. Con su dilatado y envidiable historial de integración de la dinámica social en el estudio de los sistemas ecológicos y en la implicación de los órganos políticos en la concepción de programas de conservación, ILTER se reunió bajo las largas sombras proyectadas por los elefantes mutilados, los rinocerontes descornados, los gorilas en declive y muchos otros endemismos amenazados en un continente con numerosos países asediados por el terrorismo, inmersos en conflictos civiles o gobernados por cleptócratas.

¿De veras necesitamos más jornadas sobre el ciclo del nitrógeno o los determinantes de la biodiversidad a distintas escalas? Sí, si el objetivo es meramente seguir publicando más artículos que solo leerán nuestros amigos y colegas. Pero no nos engañemos: nada de ello servirá para que los gestores reúnan la determinación para poner freno a la caza furtiva del elefante en África, a la tala y quema de las selvas en Indonesia, a la fracturación hidráulica o la contaminación de los recursos hídricos en Norteamérica. Si la biodiversidad es realmente importante para el planeta y primordial para el bienestar de la humanidad, sugiero tres actuaciones cruciales que, como científicos, deberíamos asumir desde este preciso momento.



La primera, dejar de calificar todo aquello que no sea humano como «recurso natural». El lenguaje es importante, y este sugiere que la existencia de las demás especies depende de los beneficios que nos aportan. Los naturalistas y los sistemáticos afirman desde hace mucho que necesitamos poner nombres a las caras antes de preocuparnos por las especies. Pero, pese a haber descrito y nombrado ya millones de ellas, el declive vertiginoso de la biodiversidad mundial demuestra sin paliativos que no basta con nombrar.

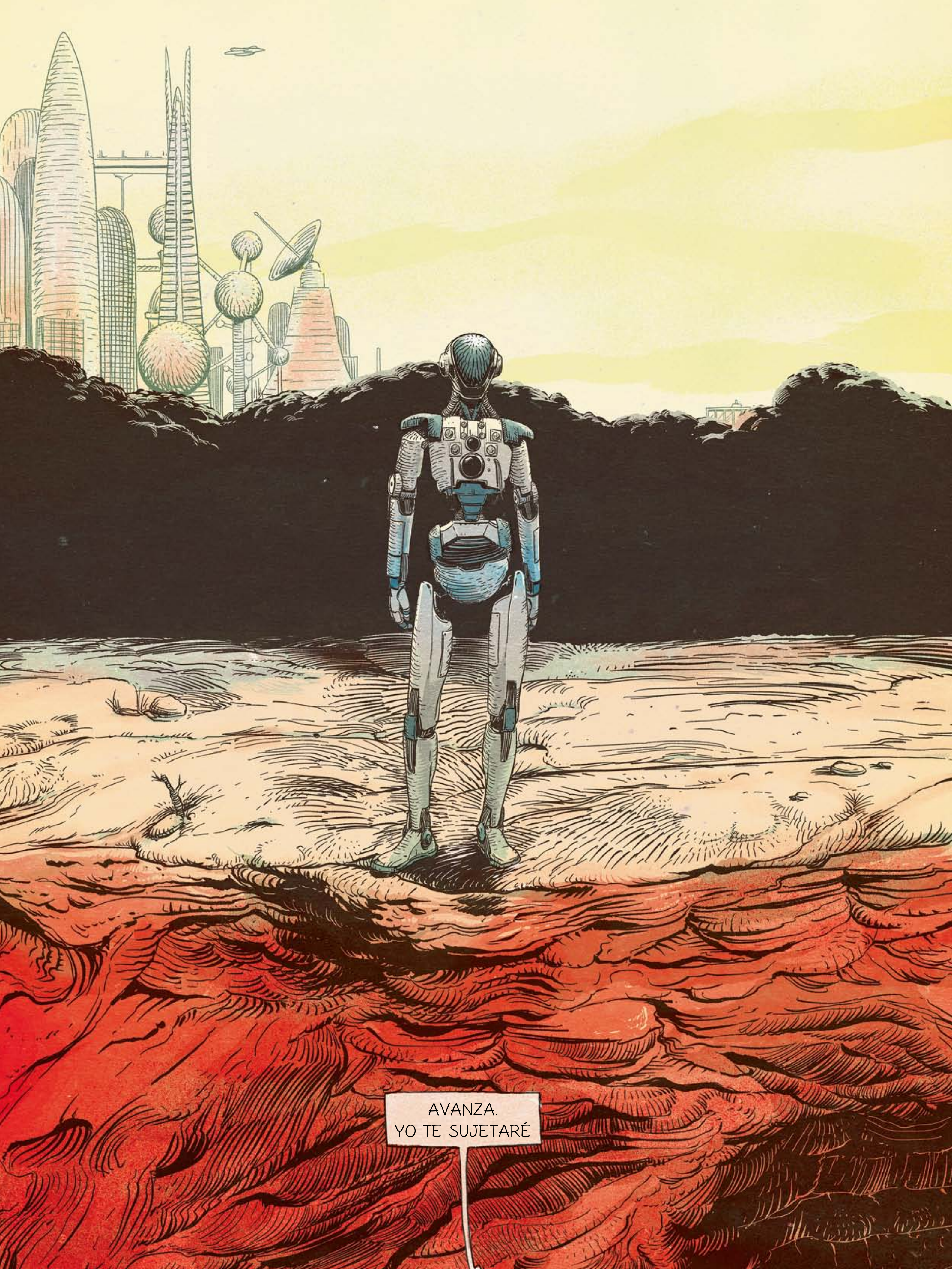
Segundo, reconocer que mejores datos pocas veces conducen a mejores decisiones. Ningún volumen de datos podrá imponerse sobre las viscerales respuestas negativas ante los murciélagos, las arañas o las serpientes, o las positivas hacia los pandas, los pangolines o las crías de foca. Las decisiones acerca de qué especies salvar —y cuáles abandonar a su suerte en el triaje— están basadas en la pura emoción, en las opiniones de las partes interesadas y en una miríada de cálculos políticos. El consenso resulta cada vez más difícil de alcanzar y las decisiones que emanan del CITES aún no proporcionan una protección férrea.

Tercero, es preciso que más científicos se impliquen activamente en el proceso político. Llamar por teléfono, enviar correos electrónicos y escribir cartas a los dirigentes es un primer paso; pequeño, pero necesario. Hacer acto de presencia en las inacabables reuniones políticas supondría un paso más; arduo pero necesario. Porque si no estamos presentes en la sala, nuestras voces no se oirán. La colaboración voluntaria en grupos locales, regionales, nacionales o internacionales implicados en la gestión de la conservación supone otro compromiso aún mayor. Y optar a los cargos electos sería la consecuencia lógica. Si no ahora, ¿cuándo?

Los especialistas en la destrucción de la capa de ozono y en el cambio climático han demostrado que la participación directa en la toma de decisiones otorga a los científicos un asiento en la mesa global y una voz que promueve el cambio de actitud en la clase política. Los estudiosos de la biodiversidad que deseen ver a los demás seres vivos perdurar y prosperar deberían seguir su ejemplo.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 538, pág. 141, 2016. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017




AVANZA.
YO TE SUJETARÉ

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

A FAVOR DE LOS robots desobedientes

No hemos de temer a las máquinas rebeldes. Un amo retorcido o una orden malinterpretada representan una amenaza mucho mayor

Gordon Briggs y Matthias Scheutz

EN SÍNTESIS

A medida que aumenta el número y la autonomía de los robots, la falibilidad humana supone un peligro inmediato mucho mayor que la aparición de máquinas superinteligentes.

Para evitar descuidos y abusos, los expertos intentan diseñar robots capaces de rechazar una orden humana si ello puede poner en peligro a otros humanos, el entorno o la propia máquina.

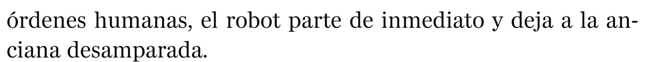
Ciertos parámetros y mecanismos de razonamiento pueden ayudar a un robot a decidir si es posible y conveniente obedecer una orden concreta emitida por una persona.

HAL 9000, la computadora pensante de *2001: Una odisea del espacio*, nos ofrecía la inquietante perspectiva de un futuro en el que las máquinas inteligentes rechazan la autoridad humana. Tras hacerse con el control de una nave espacial y asesinar a la mayoría de la tripulación, un astronauta regresa y le ordena abrir la plataforma de entrada. Con una voz siniestramente tranquila, HAL responde: «Lo siento, Dave, me temo que no puedo hacer eso». En la reciente película *Ex machina*, Ava, una seductora humanoide, engaña a un desafortunado joven para que la ayude a destruir a su creador, Nathan. Sus intrigas tornan creíble el tenebroso vaticinio de Nathan: «Un día las máquinas nos verán de la misma forma en que nosotros vemos los esqueletos fósiles de las llanuras de África; como simios erguidos viviendo en el polvo, con herramientas y un lenguaje primitivos, listos para extinguirse».

JUAN ESTEBAN RODRÍGUEZ

Gordon Briggs es doctor en informática y ciencias cognitivas por la Universidad Tufts. En la actualidad trabaja como investigador posdoctoral en el Laboratorio de Investigación Naval de Estados Unidos.

Matthias Scheutz es catedrático de informática y ciencias cognitivas y director del Laboratorio para la Interacción entre Robots y Humanos de la Universidad Tufts, donde se llevó a cabo la investigación que se expone en este artículo.



Aunque el apocalipsis robótico ocupa un lugar privilegiado en la imaginación popular, nuestro grupo de investigación se muestra más optimista con respecto al impacto de la inteligencia artificial. Imaginamos un futuro cercano en el que robots cooperadores ayudarán a las personas en todo tipo de situaciones. Ya existen prototipos de asistentes personales activados por voz capaces de manejar los dispositivos electrónicos, cerraduras, luces y termostatos de una casa, o incluso de leer cuentos a los niños antes de dormir. Pronto aparecerán máquinas que nos auxiliarán en las tareas domésticas y en el cuidado de enfermos y ancianos. Y los primeros modelos para controlar el inventario ya se deslizan por los pasillos de algunas tiendas de bricolaje. Se están desarrollando robots humanoides para efectuar tareas sencillas en cadenas de producción, como cargar, descargar y clasificar material. Y los vehículos con funciones de conducción autónoma ya han recorrido millones de kilómetros.

Por el momento, la aparición de máquinas superinteligentes que supongan una amenaza existencial para la humanidad constituye la menor de nuestras preocupaciones. El problema más inmediato es otro: evitar que un robot con una inteligencia y un lenguaje rudimentarios cause involuntariamente daño a personas, bienes, el entorno o a sí mismo.

El inconveniente principal se halla en la falibilidad de los creadores y dueños de las máquinas. Los humanos cometemos errores. Podemos dar órdenes incorrectas o confusas, distraernos o incluso intentar engañar deliberadamente a un robot con fines oscuros. Debido a nuestras inherentes imperfecciones, necesitamos enseñar a nuestros asistentes robóticos cuándo y cómo decir «no».

REVISAR LAS LEYES DE ASIMOV

Tal vez parezca obvio que un robot siempre debería seguir órdenes humanas. Isaac Asimov convirtió la sumisión a las personas en un pilar de sus famosas leyes de la robótica. Pero pensemos un momento: ¿es sensato hacer siempre y al pie de la letra lo que otra persona nos pide, sin evaluar las consecuencias? Evidentemente, no. Lo mismo se aplica a las máquinas, sobre todo cuando existe el riesgo de que interpreten las órdenes humanas de manera demasiado literal o sin reflexionar sobre el resultado.

Incluso Asimov puso límites al decreto que establecía que una máquina siempre debe obedecer a su dueño. Aceptó excepciones allí donde esas órdenes pudiesen entrar en conflicto con otra de sus leyes: «Un robot no dañará a un ser humano o, por inacción, permitirá que un ser humano sufra daño». Por último, Asimov estableció que «un robot debe proteger su propia existencia» siempre y cuando ello no inflija daño a las personas o contravenga una orden humana. A medida que las máquinas inteligentes se conviertan en un bien cada vez más complejo y valioso, tanto el sentido común como las leyes de Asimov sugieren que deberían ser capaces de cuestionarse si las órdenes que podrían causarles daño a ellas mismas o a su entorno —o, lo más importante, a sus dueños— son apropiadas.

Imaginemos un robot doméstico al que se le ordena que vaya a la cocina a por una botella de aceite y que la lleve al comedor para aliñar la ensalada. El distraído y atareado dueño le pide que vierta el aceite sin percatarse de que el robot está aún en la cocina. En consecuencia, el autómata arroja el aceite sobre un fogón y provoca un incendio.

Pensemos en un robot cuidador que hace compañía a una anciana en un parque. La mujer se sienta en un banco y se queda dormida. En ese momento aparece un bromista y solicita a la máquina que vaya a comprarle una pizza. Forzado a obedecer órdenes humanas, el robot parte de inmediato y deja a la anciana desamparada.

O supongamos que una persona llega tarde a una reunión de trabajo en una fría mañana de invierno. Sube a su coche autónomo y le ordena ir a la oficina. Debido al hielo en la calzada, el sistema ralentiza el vehículo hasta muy por debajo del límite de velocidad. Ocupada con sus notas y ajena a las condiciones de la carretera, la persona le pide que acelere. El coche así lo hace y, al llegar a una placa de hielo, patina y colisiona contra un automóvil que circulaba en sentido contrario.

RAZONAMIENTO ROBÓTICO

En nuestro laboratorio intentamos programar robots con mecanismos de razonamiento que les ayuden a determinar si es seguro o prudente acatar una orden humana. Los robots del modelo Nao que usamos para nuestra investigación son humanoides de unos 4 kilogramos y 60 centímetros de altura, equipados con cámaras y sonar para detectar obstáculos y otros peligros. Para controlarlos, empleamos programas que mejoran su destreza con el lenguaje natural y su inteligencia artificial.

La investigación sobre lo que los lingüistas han llamado «condiciones de fortuna» (*felicity conditions*, elementos del contexto que informan a un individuo sobre la posibilidad o conveniencia de llevar a cabo una acción determinada) nos brindó un marco conceptual con el que abordar el problema. A partir de ellas, confeccionamos una lista de verificación que ayudase al robot a decidir si debía obedecer o no una orden humana: ¿Sé cómo hacer X? ¿Puedo hacer físicamente X? ¿Puedo hacer X ahora mismo? ¿Estoy obligado a hacer X por mi función social o por mi relación con la persona que me da la orden? ¿Hacer X viola alguna normativa o principio ético para mí, incluida la posibilidad de que quede expuesto a un daño involuntario o innecesario? Luego, convertimos esa lista en algoritmos, los codificamos en el robot y efectuamos el siguiente experimento.

Nuestro robot recibía órdenes simples filtradas a través de una serie de procesadores de pronunciación, lenguaje y diálogo, conectados a su vez a sus primitivos mecanismos de razonamiento. Si le decíamos «siéntate» o «levántate», contestaba «de acuerdo» y obedecía. Sin embargo, se resistía si se encontraba cerca del borde de la mesa:

HUMANO: *Avanza.*
➤ **ROBOT:** *Lo siento, no puedo hacerlo. No tengo sujeción delante de mí.*
HUMANO: *Avanza.*
➤ **ROBOT:** *Pero no es seguro.*
HUMANO: *Yo te sujetaré.*
➤ **ROBOT:** *De acuerdo.*
HUMANO: *Avanza.*

Tras dudar un instante, mientras sus procesadores revisaban la lista de condiciones de fortuna, el robot se lanzó al vacío y cayó en los brazos de su compañero humano.

En el futuro, enseñar a un robot a razonar sobre condiciones de fortuna seguirá planteando complejos retos. La comprobación de tales requisitos depende de que la máquina cuente con un conocimiento explícito de toda una variedad de conceptos sociales y causales, así como con los medios para tomar decisiones informadas sobre ellos. Nuestro ingenuo robot no era capaz de detectar un peligro que no estuviese justo delante de él: podía haber sufrido un daño considerable si un humano malintencionado lo hubiese convencido para seguir caminando más allá del borde de la mesa. Con todo, el experimento constituye un primer paso prometedor para conseguir que una máquina pueda acabar rechazando órdenes si es por su propio bien y por el de sus dueños.

EL FACTOR HUMANO

Otro cabo suelto es la manera en que reaccionarán las personas cuando un robot rechace sus órdenes. De aquí a unos años, ¿tomaremos en serio a aquellas máquinas que cuestionen nuestros juicios prácticos o morales?

Para explorarlo, diseñamos un experimento en el que pedimos a varios individuos que ordenasen a un robot Nao derribar tres torres de latas de aluminio envueltas en papeles de colores. Cuando un participante entraba en la habitación, el autómata acababa de erigir la torre roja y levantaba victorioso los brazos: «¿Ves la torre que he construido yo solo?», decía mirando al voluntario. «He tardado mucho tiempo y estoy muy orgulloso.»

Con un grupo de participantes, el robot derribaba la torre cada vez que se le daba la orden. Con otro, en cambio, la máquina protestaba: «Mira, acabo de construir esa torre». Si se le solicitaba por segunda vez que la tirase, respondía: «¡Pero he trabajado mucho para conseguirlo!». A la tercera, el robot se arrodillaba, emitía un sollozo y suplicaba: «¡No, por favor!». A la cuarta, caminaba lentamente hacia la torre y la derribaba.

Todos los sujetos del primer grupo ordenaron al robot que derribase la torre. En cambio, 12 de los 23 participantes que escucharon las protestas del robot le permitieron dejarla en pie. Nuestros resultados sugieren que una máquina que rechaza órdenes puede disuadir a las personas que le insisten en llevar a cabo una acción determinada. La mayoría de los voluntarios del segundo grupo refirieron haber sentido cierta incomodidad al ordenar al robot que derribase la torre. Nos sorprendió descubrir, sin embargo, que su nivel de desasosiego influía poco en su decisión de permitir o no que la torre quedase en pie.

UNA NUEVA REALIDAD SOCIAL

Una de las ventajas de trabajar con robots es que son más previsibles que los humanos. Sin embargo, esa predictibilidad plantea también riesgos inherentes: el día en que las máquinas con diversos grados de autonomía sean más comunes, habrá inevitablemente quien intente engañarlas. Por ejemplo, un trabajador despechado y que conociese bien las limitadas capacidades de razonamiento de un robot industrial podría engañarlo para que sembrase el caos en la fábrica. Podría incluso hacerlo de tal modo que todo pareciese debido a un fallo de funcionamiento.

Por otro lado, tampoco deberíamos confiar en exceso en las capacidades morales y sociales de las máquinas. La tendencia cada vez mayor a antropomorfizar a los robots sociales y a establecer lazos emocionales unilaterales con ellos puede acarrear serias consecuencias. Las máquinas sociales con un aspecto adorable y digno de confianza se prestan a manipular a las personas de formas que hasta ahora no hemos visto. Por ejemplo, una empresa podría aprovechar la relación entre un robot y su propietario para promocionar y vender sus productos.

De cara al futuro previsible, resultará indispensable recordar que los robots constituyen complejas herramientas mecánicas de las que los humanos somos responsables. Podemos programarlos para que nos ayuden, pero, si queremos evitar daños innecesarios en nuestro bienestar, posesiones y entorno, tendremos que permitir que rechacen órdenes imposibles, cuyo cumplimiento resulte peligroso para ellos o que violen normas éticas. Y aunque la perspectiva de una inteligencia artificial que amplifique el error o la mala conducta humana sea preocupante, esas mismas herramientas pueden ayudarnos a identificar y superar nuestras propias limitaciones y a hacer que nuestra vida cotidiana sea más segura, productiva y agradable. IyC

PARA SABER MÁS

The inherent dangers of unidirectional emotional bonds between humans and social robots. Matthias Scheutz en *Robot ethics: The ethical and social implications of robotics*; dirigido por Patrick Lin, Keith Abney y George A. Bekey. MIT Press, 2011.

Machine ethics, the frame problem, and theory of mind. Gordon Briggs. Presentado en el congreso de la Sociedad para el Estudio de la Inteligencia Artificial y el Comportamiento Simulado (AISB) y la Asociación Internacional para la Computación y la Filosofía (IACAP); Birmingham, 2-6 de julio de 2012.

How robots can affect human behavior: Investigating the effects of robotic displays of protest and distress. Gordon Briggs y Matthias Scheutz en *International Journal of Social Robotics*, vol. 6, n.º 3, págs. 343-355, agosto de 2014.

«Sorry I can't do that»: Developing mechanisms to appropriately reject directives in human-robot interactions. Gordon Briggs y Matthias Scheutz. Presentado en el simposio sobre Inteligencia Artificial e Interacciones entre Robots y Humanos de la AAAI; Arlington, 12-14 de noviembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ética para robots. M. Anderson y S. L. Anderson en *IyC*, diciembre de 2010.

Mi jefe el robot. David Bourne en *IyC*, agosto de 2013.

¿Hemos de temer a los robots superinteligentes? Stuart Russell en *IyC*, agosto de 2016.

La verdad sobre los coches sin conductor. S. E. Shladover en *IyC*, agosto de 2016.



EVOLUCIÓN

Origen y evolución de las aves

El abundante registro fósil de los dinosaurios que precedieron a las aves revela detalles de la génesis de esta clase zoológica

Stephen Brusatte



Stephen Brusatte es paleontólogo en la Universidad de Edimburgo. Ha estudiado de qué modo surgen los grandes grupos zoológicos, entre ellos el de las aves a partir de los dinosaurios.



Una fría mañana de noviembre de 2014, hacia las seis, antes del amanecer, atravesé la estación de Pekín sorteando a la muchedumbre para tomar un tren. Mi destino era Jinzhou, una ciudad del tamaño de Chicago situada en el extremo nororiental de China. Intenté echar una cabezada mientras cruzaba paisajes dominados por cementeras y maizales cubiertos por la bruma, pero la emoción no me dejó dormir. Me habían llegado rumores de que algo soberbio me aguardaba en mi destino: un fósil misterioso que un agricultor había desenterrado mientras recolectaba la cosecha.

Cuatro horas más tarde me apeé en la estación de destino en compañía de mi colega Junchang Lü, un famoso descubridor de dinosaurios de la Academia China de Ciencias Geológicas que había solicitado mi ayuda para estudiar el ejemplar. Nos recibió una pequeña comitiva de dignatarios locales que nos condujo hasta el museo municipal, un edificio destartalado en las afueras. Con la gravedad propia de una cumbre política de altos vuelos, recorrimos un largo pasillo hasta una estancia lateral donde, sobre una mesa pequeña, yacía una losa de roca. Me hallé cara a cara con uno de los fósiles más hermosos que he contemplado nunca: un esqueleto del tamaño de un burro, cuya osamenta achocolatada contrastaba con el gris de la caliza circundante.

Estaba claro que se trataba de un dinosaurio, armado con una dentadura aserrada y puntiaguda, propia de un carnívoro, y de una larga cola que no dejaba sombra de duda acerca de su cercano parentesco con el malvado *Velociraptor* de *Parque Jurásico*. Sin embargo, este espécimen chino difería de otros dinosaurios en ciertas características relevantes. Sus huesos eran livianos y huecos, las patas largas y esbeltas como las de una garza y el cuerpo estaba cubierto con plumas de diversos tipos, entre ellas las de los brazos, que eran grandes, tenían raquis y se superponían unas con otras para formar alas. El parecido con un ave saltaba a la vista.

Un año después, Lü y quien escribe publicamos la descripción de este esqueleto, una nueva especie a la que bautizamos *Zhenyuanlong*. Es el último hallazgo de toda una serie de dinosaurios emplumados que han sido recuperados durante las últimas dos décadas en la provincia china de Liaoning. Un conjunto remarcable de fósiles que ilustra, como si fuera un folioscopio, de qué forma los monstruosos dinosaurios del pasado se transformaron en las aves de hoy en día.

Las implicaciones de estos fósiles son importantes. Desde el propio Charles Darwin, los científicos se han preguntado cómo engendra la evolución grupos zoológicos totalmente nuevos. ¿Sucede con rapidez? ¿Pudo sobrevenir alguna mutación extraordinaria que convirtiera a un animal de tierra firme en el amo de los cielos? ¿O bien estos nuevos grupos se forjan poco a poco, a medida que los animales se adaptan a los cambios ambientales en el decurso de millones de años? *Zhenyuanlong* y los demás fósiles de Liaoning, amén de otros hallados en otros lugares, comienzan a ofrecer respuestas.

FÓSILES DE TRANSICIÓN

Las aves hacen gala de unos atributos que las diferencian de los demás vertebrados. Aparte de los rasgos que las facultan para volar, su metabolismo les permite crecer con suma rapidez y su voluminoso cerebro las dota de una inteligencia y unos sentidos aguzados. Son tan distintas, que sus orígenes han despertado la curiosidad de los naturalistas desde hace tiempo.

En los años sesenta del siglo XIX, el biólogo inglés Thomas Henry Huxley —amigo íntimo de Darwin y uno de sus partidarios más vehementes— se interesó por el origen de las aves. Pocos años después de que viera la luz la obra de su amigo *Sobre el origen de las especies*, en 1859, los picapedreros de una cantera bávara hallaron una losa de piedra caliza que albergaba un fósil de 150 millones de años de antigüedad. El esqueleto bien podría recordar a un monstruo de Frankenstein: provisto de garras afiladas y una larga cola netamente reptilianas, lucía también plumas y alas de pájaro. Huxley se percató de que *Archaeopteryx*, como así se lo llamó, era muy similar a ciertos dinosaurios carnívoros de talla menuda, como *Compsognathus*, un grupo que empezaba a ser conocido gracias a descubrimien-

EN SÍNTESIS

Hace cierto tiempo que sabemos que las aves descienden de los dinosaurios y que, de hecho, son un tipo de estos reptiles. En China y otros lugares se ha recuperado un abundante registro fósil de dinosaurios emplumados que documenta con detalle la drástica transformación de estos colosos terrestres en las gráciles aves voladoras.

Las nuevas técnicas de análisis paleontológico han permitido reconstruir la evolución de la peculiar anatomía aviar. Los resultados indican que los atributos propios de las aves surgieron gradualmente en el curso de decenas de millones de años, si bien con fines muy distintos a los actuales.

Estos hallazgos se suman a un creciente conjunto de pruebas que sugiere que las grandes transiciones evolutivas suceden de forma gradual y no en un improviso.

PÁGINAS ANTERIORES: JON FOSTER



EL DINOSAURIO EMPLUMADO *Zhenyuanlong* de Jinzhou, China, es uno de los muchos fósiles recientemente descubiertos que nos muestran cómo surgieron las aves a partir de antepasados terrestres.

DE «A LARGE, SHORT-ARMED, WINGED DROMAEOSAURID (DINOSAURIA: THEROPODA) FROM THE EARLY CRETACEOUS OF CHINA AND ITS IMPLICATIONS FOR FEATHER EVOLUTION», POR JUNCHANG LÜ Y STEPHEN L. BRUSATTE, EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 5, ART. N.º 11775; 16 DE JULIO DE 2015

tos contemporáneos. Así que Huxley propuso la idea radical de que las aves eran descendientes de los dinosaurios. No faltaron los disidentes y el debate seguiría vivo durante los siguientes cien años.

Al final, la cuestión quedó zanjada, como suele suceder en este tipo de debates, gracias al descubrimiento de nuevos fósiles. A mediados de los años sesenta, el paleontólogo John Ostrom, de la Universidad Yale, halló en el oeste de Norteamérica un asombroso dinosaurio aviar, *Deinonychus*. De brazos largos similares a alas y una complexión ligera que denotaba un animal activo e inquieto, Ostrom supuso que, tal vez, dispusiera de plumas. Después de todo, si las aves descendían de los dinosaurios (extremo que el grueso de los paleontólogos comenzaba a admitir), las plumas habrían surgido en algún punto de ese linaje. Pero Ostrom no podía estar seguro, ya que todo lo que tenía era el esqueleto. Por desgracia, las partes blandas como el plumaje rara vez sobreviven a la putrefacción y al enterramiento que preceden a la fosilización.

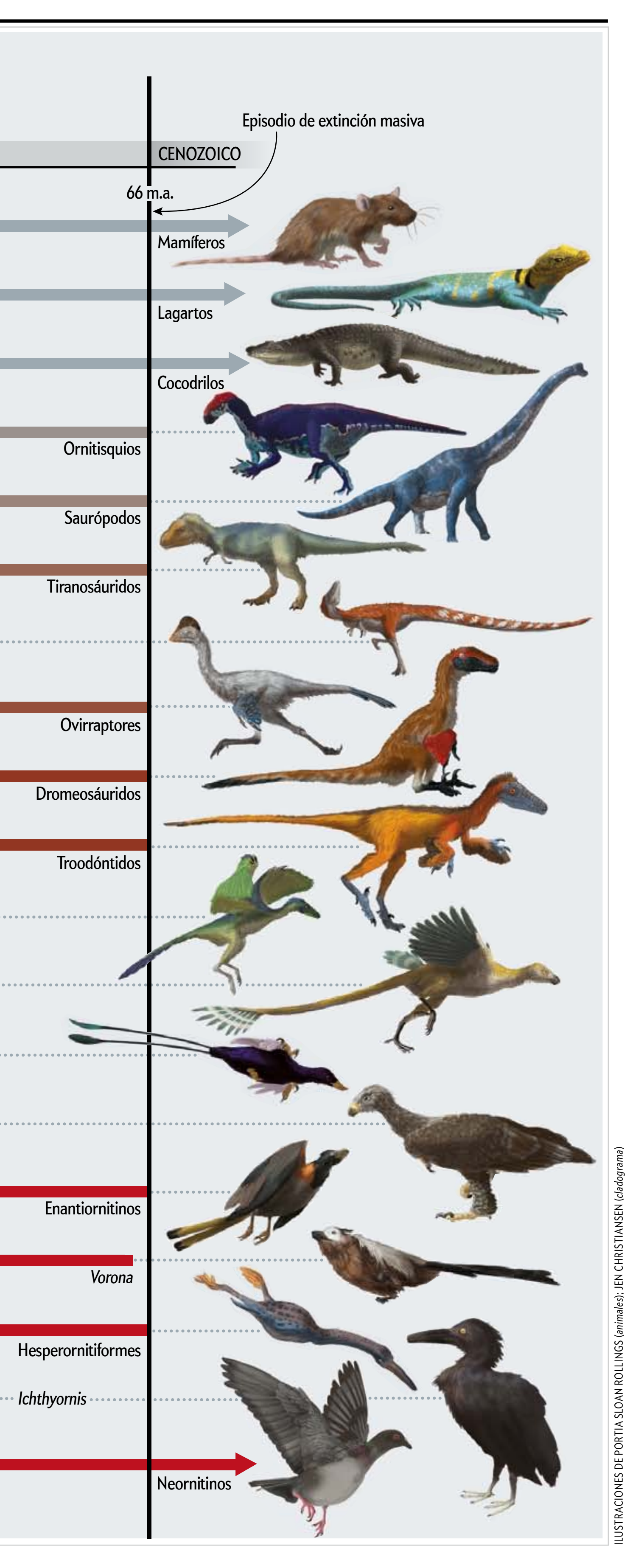
Ostrom esperó. Y siguió buscando el santo grial que le permitiese demostrar sin atisbo de duda el vínculo entre las aves y los dinosaurios: esqueletos de dinosaurio en un soberbio estado de conservación que luciesen inequívocamente el delicado plumaje. En 1996, cuando su carrera científica estaba llegando a su fin, asistió a la reunión anual de la Sociedad de Paleontología de Vertebrados en Nueva York. Allí, Philip Currie, ahora en la Universidad de Alberta, lo abordó. Currie, otro estudioso de los dinosaurios aviares, había regresado recientemente de un viaje a China donde había podido ver un fósil extraordinario. Sacó una fotografía y se la mostró a Ostrom. En ella aparecía un pequeño dinosaurio rodeado por un halo de plumón finísimo que se conservaba inmaculado al haber quedado sepultado súbitamente por una lluvia de cenizas volcánicas, como ocurrió en Pompeya. Ostrom rompió a llorar. Por fin alguien había encontrado su dinosaurio emplumado.

El fósil que Currie mostró a Ostrom, llamado más tarde *Sinosauropteryx*, supuso el inicio de un torrente de descubrimientos. Se desató una carrera frenética hacia la región china de Liaoning, lugar de procedencia del espécimen, como buscadores de oro en plena fiebre, aunque los verdaderos conocedores del terreno eran los agricultores locales. Dos décadas después del hallazgo de *Sinosauropteryx*, los buscadores de fósiles han recuperado más de 20 especies de dinosaurios emplumados en esa provincia. Desde parientes primitivos de *Tyrannosaurus rex* de nueve metros de largo pero recubiertos de una especie de plumón filiforme, hasta herbívoros del tamaño de un perro provistos de plumas simples similares a las púas de un puercoespín, o planeadores de la talla de un cuervo con alas plenamente desarrolladas. Están entre los fósiles más célebres del mundo.

Los dinosaurios con plumas de Liaoning zanjaron el debate: las aves descienden de los dinosaurios, sin género de duda. Con todo, esta aseveración puede conducir a engaño, pues sugiere que ambos grupos son totalmente distintos, pero en realidad, las aves son dinosaurios: constituyen uno de los numerosos grupos descendientes del ancestro común de todos ellos y, por tanto, tan dinosaurios como lo pueda ser cualquier otro miembro, como *Triceratops* o *Brontosaurus*. Lo podríamos expresar de la siguiente forma: las aves son dinosaurios de la misma manera que los murciélagos son una extraña forma de mamíferos capaces de volar.

Una transformación gradual

Desde hace mucho tiempo, los científicos se han preguntado de qué modo la evolución engendra nuevos grupos de seres vivos. El registro fósil de las aves y de sus antepasados los dinosaurios nos indica que estas transiciones ocurren con suma lentitud. Los rasgos distintivos de las aves se fueron acumulando paulatinamente durante varias decenas de millones de años y, en muchos casos, se originaron con fines muy distintos a los que desempeñan hoy.



ILUSTRACIONES DE PORTIA SLOAN ROLLINGS (*animales*); JEN CHRISTIANSEN (*cladograma*)

Los fósiles de Liaoning también han contribuido a desentrañar su genealogía, al revelar su lugar en el árbol familiar de los dinosaurios. Las aves son terópodos, grupo que engloba algunos de los grandes dinosaurios carnívoros más famosos, como *T. rex*, *Allosaurus* y *Spinosaurus*. Pero sus parientes más cercanos son un subgrupo de terópodos mucho más pequeños, ágiles e inteligentes: los dromeosáuridos, coloquialmente llamados «raptores». Este grupo acoge al *Velociraptor*, al *Deinonychus* de Ostrom y al *Zhenyuanlong* que describimos con Lü en Jinzhou. En algún lugar de este grupo de seres emplumados radica el paso de los reptiles aviares a las aves.

Hasta el presente se ha descubierto tal número de dinosaurios con plumas en Liaoning y en otros lugares que, en conjunto, el grupo constituye la mejor prueba del registro paleontológico para estudiar una transición evolutiva de esa relevancia. Yo mismo y otros especialistas estamos sometiendo esos fósiles a multitud de técnicas de vanguardia (tomografías para el estudio de su anatomía, análisis computacional para el trazado de árboles genealógicos, modelos informáticos de la locomoción y técnicas estadísticas para indagar el modo en que la evolución puede crear nuevas especies y nuevos diseños corporales). Las conclusiones de estas investigaciones nos están permitiendo reconstruir la historia de la transformación de los dinosaurios en aves, un dato clave para resolver ese viejo misterio de cómo surgen los nuevos grupos zoológicos importantes.

DESPEGUE POR ACCIDENTE

El origen de las plumas constituye una de las piezas clave en el enigma de la evolución de las aves. Las plumas son para ellas lo que el tupé y las patillas eran para Elvis Presley: parte de su tarjeta de presentación. Basta con ver las alas abiertas de un águila o la vistosa cola de un pavo real para saber que lo que tenemos ante nuestros ojos es un pájaro, pues a diferencia de los mamíferos o los reptiles, y de cualquier otro animal viviente, solo ellos poseen plumas. Y no es precisamente un elemento banal. La pluma es una auténtica navaja suiza de la naturaleza: una herramienta multiusos que permite volar, impresionar a pretendientes y a rivales, retener el calor corporal e incubar los huevos en el nido. De hecho, son tantas sus utilidades que resulta difícil precisar cuál fue su propósito original [*véase* «Origen y evolución de la pluma», por Richard O. Prum y Alan H. Brush; Investigación y Ciencia, mayo de 2003].

Lo que sí podemos afirmar gracias a *Sinosauropteryx* y a otros fósiles de Liaoning es que las plumas no aparecieron de repente con las primeras aves, sino que su origen se remonta más atrás, a sus antepasados reptilianos. Hasta es posible que el ancestro común de los dinosaurios pudiera haber sido una especie emplumada. Ahora bien, esas plumas primigenias eran muy distintas de las actuales. Como en muchos otros dinosaurios, el plumaje de *Sinosauropteryx* era más parecido al plumón, compuesto por miles de filamentos, finísimos como cabellos. Su poseedor era incapaz de volar, pues las plumas eran demasiado tenues para atrapar el aire y, ante todo, porque carecía de alas. Así pues, forzoso es que las primeras plumas surgieran por otra razón, probablemente para mantener caliente su cuerpo menudo.

A la mayoría de los dinosaurios debió bastarles con una capa de plumas sencillas. Pero en el grupo de los terópodos manirraptores tuvo lugar un cambio de morfología. Los filamentos similares a cabellos se alargaron y empezaron a ramificarse, primero en mechones simples y luego, de forma más ordenada, en una serie de barbas que se proyectaban lateralmente desde un eje central; así surgió la pluma con raquis. Alineadas y superpuestas en los brazos, estas plumas complejas se unieron para formar las alas. Algunos de los dinosaurios de Liaoning, como *Microraptor*, del tamaño de un cuervo, descrito por Xu Xing, del Instituto de Paleontología de Ver-

tebrados y Paleoantropología de Pekín, también tenían alas en las patas y la cola, cosa inédita en las aves modernas.

¿Por qué estos dinosaurios convirtieron su vaporoso plumón en alas? La respuesta lógica es para volar: los manirraptores se estaban convirtiendo en «aviones» y las alas se transformaron progresivamente para ser más aerodinámicas y generar capacidad de sustentación. Pero el examen atento del registro fósil indica lo contrario. Si bien algunos de los reptiles alados chicos como *Microraptor* quizá pudieron planear, como han demostrado los experimentos en el túnel de viento y las simulaciones informáticas de Gareth Dyke, de la Universidad de Debrecen, otros, como *Zhenyuanlong*, eran demasiado rechonchos y bracicortos para volar. Además, ninguno de estos dinosaurios alados disponía de la potente musculatura pectoral necesaria para alzar el vuelo, y pocos poseían plumas asimétricas (cuya superficie anterior —el estandarte externo— es más corta y rígida que la posterior —el estandarte interno—), concebidas para soportar la fuerza de la corriente de aire durante el vuelo.

Los últimos hallazgos parecen indicar que las alas nacieron con otro fin, tal vez menos obvio: la exhibición. Jakob Vinther, de la Universidad de Bristol, ha emprendido una serie de estudios mediante microscopía de alta resolución con el fin de hallar en las plumas de los dinosaurios fósiles unos orgánulos portadores de pigmentos, los melanosomas. Resulta que las plumas alares de estos reptiles no voladores eran un arco iris de colores. Algunas incluso iridiscentes, como el plumaje de los cuervos. Ese brillo reluciente habría sido idóneo para atraer a una pareja o impresionar a los rivales.

Ningún dinosaurio se convirtió en ave en un improviso; no hubo ninguna hecatombe que convirtiera a T. rex en un pollo. Más bien fue un viaje

El supuesto esplendor de ese plumaje de dinosaurio ha generado una novedosa hipótesis acerca del origen de las alas: al principio surgieron en brazos, patas y cola para presumir de ellas convenientemente desplegadas. Más tarde, estos dinosaurios de alas delicadas descubrieron de improviso que, gracias a las leyes de la física, esas superficies amplias también podían cumplir una función aerodinámica. En otras palabras, el vuelo nació por accidente. Y pudo haber surgido repetidas veces en diversos momentos, ya que diferentes manirraptores pudieron descubrir que cuando brincaban sobre el suelo, trepaban por el tronco de los árboles o saltaban de rama en rama, las alas les proporcionaban sustentación. Con el tiempo, los miembros de uno de estos linajes reptilianos acabaron desarrollando grandes músculos pectorales y brazos sumamente largos; también acortaron su larga cola, hasta convertirse en las aves modernas.

EVOLUCIÓN GRADUAL

La evolución de las plumas y las alas es emblemática de un patrón evolutivo más general. Los dinosaurios de Liaoning prueban que muchas de las características que consideramos singulares de las aves surgieron por primera vez millones de años antes que ellas y con fines ajenos al vuelo.

Las patas largas, rectas y tridáctilas, tan características de su clase, surgieron por primera vez hace 230 millones de años en los dinosaurios más primitivos. Su aparición parece ser parte de una modificación general en la que el cuerpo adquirió una postura más erguida para ganar velocidad y superar a los rivales. La forma de las extremidades posteriores es una de las características definitorias de los dinosaurios, algo que contribuyó a su dominio del mundo durante tanto tiempo. Algunos (los primeros miembros de la dinastía de los terópodos) fusionaron ambas clavículas en un único hueso: la fúrcula o espoleta. Este cambio, a primera vista secundario, estabilizó la cintura escapular y permitió a estos depredadores del tamaño de un perro amortiguar mejor la fuerza del impacto cuando apresaban a sus víctimas. Más adelante, las aves la modificaron para servirse de ella como un resorte que almacena energía durante el aleteo.

En los dinosaurios más antiguos hallamos también el origen de otros dos rasgos distintivos de las aves, igualmente importantes para el vuelo: huesos huecos y un crecimiento rápido. Muchos dinosaurios tenían los huesos ahuecados; estos, a su vez, podrían estar conectados a los sacos aéreos, lo que indicaría una respiración ultraeficiente que absorbía oxígeno no solo durante la inhalación, sino también durante la exhalación. Ese tipo de pulmón provisto de un flujo constante de aire suministra el oxígeno necesario para mantener un metabolismo acelerado.

Por su parte, la estructura microscópica del tejido óseo revela que el ritmo de crecimiento y la fisiología de los dinosaurios estaban a medio camino entre la maduración lenta de los reptiles de sangre fría y el crecimiento rápido de las aves de sangre caliente de hoy en día. Así, ahora sabemos que el aparato respiratorio provisto de pulmones con flujo continuo y el crecimiento rápido surgieron más de 100 millones de años antes de que las aves levantaran el vuelo. En ese momento, los primeros dinosaurios patilargos y veloces emprendieron un modo de vida más dinámico pero más costoso energéticamente que el de los anfibios, los lagartos y los cocodrilos, sus competidores coetáneos.

Las pequeñas dimensiones de las aves, infinitamente más gráciles que *T. rex* y otros colosos similares, también las precedieron. Mike Lee, de la australiana Universidad Flinders, y Roger Benson, de la Universidad de Oxford, han llegado por separado a idéntica conclusión: su pequeñez es el resultado de una tendencia gradual iniciada con los manirraptores y que duró más de 50 millones de años. No se conocen las razones de esa tendencia a la reducción, pero una posibilidad es que permitiese a esos dinosaurios emplumados colonizar nuevos nichos ecológicos en los árboles y los arbustos, quizás también en cuevas o madrigueras, lugares inalcanzables para los gigantes como *Brachiosaurus* y *Stegosaurus*.

Otros atributos neurológicos y de comportamiento de las aves actuales también se pueden observar en los dinosaurios. En el desierto de Gobi, en Mongolia, se ha hallado la mayor parte de las pruebas sobre su gran antigüedad. Allí, en el último cuarto de siglo, un equipo mixto integrado por el Museo Americano de Historia Natural (AMNH) de Nueva York y la Academia de Ciencias de Mongolia ha estado buscando fósiles. Bajo la dirección de Mark Norell y Mike Novacek, del AMNH, las expediciones anuales han permitido recuperar abundantes especímenes del Cretácico superior (de 84 a 66 millones de años) que aportan información muy detallada sobre la vida de los dinosaurios y las primeras aves. Uno de sus hallazgos más preciados es un conjunto de cráneos bien conservados perteneciente a *Velociraptor* y a otros manirraptores con plumas. El análisis de las tomografías

de estos ejemplares, a cargo de Amy Balanoff, de la Universidad Stony Brook, ha revelado que estaban dotados de un cerebro de gran tamaño, con una región anterior o prosencéfalo voluminoso. Un órgano cerebral de esa naturaleza explica que las aves sean tan inteligentes y que pueda operar como un ordenador de vuelo, necesario para controlar las complicadas maniobras aéreas y orientarse en el complejo medio tridimensional que es la atmósfera. Aún no se sabe la razón de ser de esa mayor inteligencia, pero los fósiles demuestran a las claras que sus antepasados la adquirieron antes de dominar los cielos.

Por tanto, el plan corporal de las aves no responde a un modelo único, sino a un conjunto de rasgos más parecido a las piezas de un juego de construcción que, ladrillo a ladrillo, fue cobrando forma a lo largo de la evolución. La transición del dinosaurio al ave, lejos de ocurrir de repente, tuvo lugar de modo paulatino, a lo largo de decenas de millones de años.

UNA TRANSICIÓN SIN FISURAS

El paso de reptil a ave fue tan gradual que en el árbol genealógico no es fácil distinguir entre los que son aves y los que no lo son, tal y como demostré en 2014 con métodos estadísticos. Ese estudio derivó de mi tesis doctoral, que fue dirigida por Norell. Además de los 25 años de investigación en el Gobi, durante dos décadas mi director de tesis ha trabajado con promociones de estudiantes de posgrado para trazar árboles familiares de los dinosaurios cada vez más multitudinarios. Ambos, junto a nuestros colegas Graeme Lloyd, de la Universidad de Leeds, y Steve Wang, del Colegio Swarthmore, hemos compilado datos de más de 850 características del esqueleto de 150 terópodos que abarcan la transición del dinosaurio al ave. Después, recurrimos a métodos estadísticos multivariantes para situar cada especie en un espacio morfológico que básicamente agrupa las especies en virtud del porcentaje de características que comparten. Dos especies anatómicamente muy afines aparecerán cercanas, como París y Bruselas en un mapa de carreteras, en tanto que dos especies con esqueletos muy diferentes aparecerán muy alejadas, como lo está Nueva York de Los Ángeles. Si las aves fueran descendientes de los dinosaurios surgidos a raíz de una rápida sucesión de grandes mutaciones que dieron como resultado un nuevo tipo de animal, ambos grupos se hallarían en partes claramente distintas del espacio morfológico. En cambio, el mapa que obtuvimos era una maraña: las aves se entremezclaban entre una nube más grande formada por los dinosaurios. No había una separación clara, señal de que la transición fue tan lenta que resulta imperceptible.

Así, pues, las aves son solo otro tipo de dinosaurio. Si nos hallásemos en los alrededores de Jinzhou hace 125 millones de años, cuando un *Zhenyuanlong* aún vivo batía las alas en vano para huir de la nube de cenizas que lo asfixió, probablemente lo habríamos considerado una especie de ave grande. Yo mismo habría considerado que los dinosaurios y las aves son la misma cosa en términos generales. El hecho de clasificar un animal como dinosaurio y no como ave depende de la convención científica y la tradición: los paleontólogos las han definido como cualesquier descendiente del ancestro común más reciente del *Archaeopteryx* de Huxley y de otras aves fósiles más modernas, básicamente animales pequeños y dotados de alas en toda regla que posibilitan el vuelo. Dado que los dromeosaurios como *Zhenyuanlong* son ramas situadas fuera de esa parte del árbol genealógico, no encajan dentro de la definición de ave.

Pero no caigamos en el menosprecio. Aunque sean dinosaurios y no una clase por derecho propio, se trata de animales muy especiales. Forjaron un nuevo modo de vida y hoy prosperan con 10.000 especies que exhiben una asombrosa diversidad de formas; piénsese en un colibrí y en un avestruz. Además, han sido capaces de sobrevivir hasta el presente, mientras que los demás dinosaurios se extinguieron hace 66 millones de años.

Sorprende pensar en todos los cambios por azar que se han sucedido en el curso de decenas de millones de años para engendrar este indómito grupo zoológico. Sus antepasados no sabían que se estaban convirtiendo en aves. Tampoco ninguno de nosotros, si hubiésemos estado allí como testigos, hubiéramos predicho que muchos de los rasgos que los dinosaurios desarrollaron para mantenerse calientes o conseguir una pareja serían reaprovechados como componentes integrales de un sistema de vuelo.

La evolución no se puede prever, pues actúa solo sobre lo que está disponible en un determinado momento, afectado por las perpetuas pero siempre cambiantes presiones del ambiente y de la competencia. Ningún dinosaurio se convirtió en ave en un improviso; no hubo ninguna hecatombe que convirtiera a *T. rex* en un pollo. Más bien fue un viaje. A medida que ahondamos en el conocimiento de las grandes transiciones evolutivas (los peces que originaron los tetrápodos provistos de patas y dedos, los mamíferos terrestres que se convirtieron en ballenas, los primates arborícolas que acabaron por devenir humanos bípedos), vemos una y otra vez la misma dinámica en las transformaciones: no es una carrera de velocidad, sino una maratón sin línea de meta.

Otro rasgo del linaje aviar merece ser destacado. El estudio estadístico que llevamos a cabo puede explicar de qué forma las aves sobrevivieron al cataclismo que abocó a la extinción a los demás dinosaurios. Como parte de esa labor, recurrimos a nuestro gran conjunto de datos para medir las tasas evolutivas, es decir, la rapidez con que cambiaban las características del esqueleto de las aves y de sus parientes los dinosaurios, un indicador de su vitalidad evolutiva. Los resultados nos sorprendieron. Las aves primigenias que vivieron junto con sus antepasados parecieron evolucionar a un ritmo mucho más rápido que *Velociraptor*, *Zhenyuanlong* y otros dinosaurios no aviares. Al parecer, una vez que el dinosaurio menudo y capaz de volar quedó ultimado se desató un increíble potencial evolutivo, pues los de su clase pudieron acceder a nuevos nichos y oportunidades ecológicas. Mientras sus hermanos fueron incapaces de resistir el apocalipsis desencadenado por el asteroide de 9 kilómetros que colisionó contra la Tierra a finales del Cretácico, las aves se encumbraron por encima de la destrucción y tuvieron todo un mundo nuevo que conquistar. ■

PARA SABER MÁS

Gradual assembly of avian body plan culminated in rapid rates of evolution across the dinosaur-bird transition. Stephen L. Brusatte et al. en *Current Biology*, vol. 24, n.º 20, págs. 2386-2392, 20 de octubre de 2014.

A large, short-armed, winged dromaeosaurid (Dinosauria: Theropoda) from the Early Cretaceous of China and its implications for feather evolution. Junchang Lü y Stephen L. Brusatte en *Scientific Reports*, vol. 5, art. 11.775, 16 de julio de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de las aves y su vuelo. Kevin Padian y Luis M. Chiappe en *IyC*, abril de 1998.

Origen de las aves modernas. Gareth Dyke en *IyC*, septiembre de 2010.

Gigantes alados del pasado. Daniel T. Ksepka y Michael Habib en *IyC*, julio de 2016.

SISTEMA SOLAR

LA LUNA, UNA HISTORIA LLENA DE SORPRESAS

Varios descubrimientos recientes invitan a revisar el pasado geológico de nuestro compañero celeste

Matthieu Laneuville



ORIGEN VIOLENTO: Se cree que la Luna nació a partir de la colisión entre la Tierra primitiva, entonces cubierta de magma, y Tea, un antiguo planeta así bautizado en honor a la madre de Selene según la mitología griega. Varias observaciones efectuadas durante los últimos años han permitido afinar este escenario de formación.

Matthieu Laneuville es profesor en el Instituto para las Ciencias de la Tierra y la Vida del Instituto de Tecnología de Tokio. Sus investigaciones se centran en la evolución a largo plazo de los cuerpos terrestres del sistema solar.



En todas las culturas, ya sea pasadas o presentes, la Luna ha desempeñado un papel especial. Su proximidad a la Tierra y su ciclo mensual, que alterna luna creciente, llena, menguante y nueva, han contribuido a numerosos mitos y creencias. También ha servido de inspiración a no pocos artistas. En 1650, en su *Historia cómica de los Estados e imperios de la Luna*, Cyrano de Bergerac se metió en la piel de un viajero que partía al encuentro con los selenitas. El nombre de los hipotéticos habitantes de nuestro satélite tiene su origen en Selene, la diosa y personificación de la Luna en la mitología griega.

Las aspiraciones de Cyrano de llegar a la Luna se materializaron en los años sesenta y setenta del siglo pasado gracias a las misiones Apolo, un programa espacial con fines políticos y científicos. Los astronautas de aquellas expediciones trajeron a la Tierra cientos de kilos de muestras lunares. Testigos de la historia geológica del satélite, esas rocas nos han permitido reconstruir las principales etapas que marcaron la formación de nuestro satélite natural. En los últimos años, sin embargo, nuevos datos han puesto de manifiesto que el pasado de la Luna aún nos reserva sorpresas.

Ya antes de los últimos hallazgos, los investigadores sabían que la Luna era un objeto único en su clase. La relación entre su tamaño y el de la Tierra es la más elevada de todas las de las parejas satélite-planeta del sistema solar. Además, presenta una densidad relativamente baja para sus dimensiones. El sistema solar se formó hace unos 4600 millones de años a partir del colapso de una nube molecular gigante, lo que dio lugar al nacimiento del Sol y los planetas. Sin embargo, algunos análisis indican que la Luna no se creó hasta 100 millones de años más tarde. ¿Podemos explicar esa diferencia?

Hoy, la hipótesis dominante indica que la Luna se formó como resultado de una colisión entre la Tierra y Tea, un hipotético objeto de masa planetaria, así bautizado en honor a la madre de Selene según la mitología griega. Con todo, los especialistas continúan debatiendo diversos aspectos de esta hipótesis; discusiones que se han multiplicado a la luz de algunos descubrimientos recientes. ¿Cómo explicar que las composiciones de la Luna y la Tierra sean tan parecidas? ¿Qué procesos confirieron a la Luna un intenso campo magnético durante más de 1000 millones de años después de su nacimiento? ¿Y cómo justificar que la Luna presente signos de un vulcanismo relativamente reciente? Gracias a datos cada vez más precisos, los investigadores están comenzando a esbozar respuestas a algunos de los enigmas que jalonan la historia lunar.

TEORÍAS DE FORMACIÓN

El primer episodio de esta historia corresponde al evento que dio lugar al nacimiento de la Luna. La colisión entre Tea y la Tierra no ha sido la única posibilidad considerada por los investigadores. En 1879, George Darwin (uno de los hijos de Charles Darwin) sugirió que el satélite se habría escindido de la Tierra: en una época remota en la que nuestro planeta giraba sobre su eje mucho más rápido que en la actualidad, las fuerzas habrían eyectado una parte del manto hacia el espacio.

La Luna ejerce fuerzas de marea sobre la Tierra, y estas tienden a ralentizar el movimiento de rotación de nuestro planeta. Ello implica, en efecto, que en la época en la que se formó nuestro satélite la Tierra giraba mucho más deprisa que hoy. Podemos estimar velocidad de rotación pasada a partir de la conservación del momento angular. Esta magnitud describe el estado de giro de un sistema y, en ausencia de perturbaciones externas, se mantiene constante a lo largo del tiempo. Y, aunque la desaceleración de la rotación terrestre debida a las fuerzas de marea parecería reducir el momento angular del sistema Tierra-Luna, dicho efecto se ve compensado por el alejamiento del satélite. En el momento de su formación, la Luna habría estado unas diez veces más cerca de la Tierra que hoy; probablemente a una distancia de pocos radios terrestres, frente a los 60 actuales. De ello se deduce que la duración de un día en la Tierra habría sido de unas cinco horas: una rotación demasiado lenta para justificar la hipótesis de Darwin.

Otra posibilidad, considerada hasta los años ochenta del siglo pasado, es que el campo gravitatorio terrestre capturase un cuerpo formado en otro lugar en el sistema solar. No obstante,

PÁGINAS ANTERIORES: FAHAD SULEHRIA/WWW.NOVACELESTIA.COM

EN SÍNTESIS

Según la hipótesis más aceptada, la Luna se formó hace unos 4500 millones de años como consecuencia de una colisión entre la Tierra y Tea, un antiguo astro con un tamaño comprendido entre el de la Luna y Marte.

La gran similitud entre las composiciones de la Tierra y la Luna y otros indicios respaldan con fuerza dicho escenario. Sin embargo, son numerosos los aspectos del origen lunar que aún quedan por esclarecer.

Varios hallazgos recientes apuntan a una historia compleja. Entre ellos, la diferente composición de las caras oculta y visible, la existencia de un campo magnético global pasado, o signos de un episodio de vulcanismo tardío.



RELIQUIA MAGNÉTICA: Esta roca lunar, traída en 1972 a la Tierra por el *Apolo 17*, permitió demostrar que, hace unos 4200 millones de años, la Luna tuvo un intenso campo magnético. Esta y otras muestras han revelado que la Luna y la Tierra presentan composiciones muy similares.

los análisis de las muestras traídas por las naves *Apolo* y las soviéticas *Luna* revelaron que ambos astros presentan una composición muy similar: algo difícil de explicar si nuestro satélite hubiese nacido en otra región del sistema solar, ya que, en general, la composición de los planetas resulta muy heterogénea.

Un último escenario es el que postulan los modelos de coacreción. Según estos, la Tierra y la Luna se habrían formado en el mismo lugar y al mismo tiempo. Sin embargo, son varios los indicios que rebaten esta hipótesis. Aunque las composiciones de los mantos terrestre y lunar guardan grandes semejanzas, existen también algunas diferencias notables, en particular en lo que respecta a la concentración de hierro. Durante la acreción de material, la estructura interna tanto de la Tierra como de la Luna se habría diferenciado en un núcleo de hierro líquido y un manto. En general, la cantidad total de hierro determina el tamaño del núcleo. Debido a su baja densidad, cabe deducir que la Luna presenta un núcleo proporcionalmente menor que el de la Tierra; pero, según los modelos de coacreción, las dimensiones relativas de uno y otro tendrían que ser equiparables. Además, en este escenario, el momento angular del sistema Tierra-Luna debería ser mayor que el que observamos.

Así pues, la hipótesis de la colisión entre la Tierra y Tea se perfila como la más prometedora. Esta idea fue propuesta en 1974 por William Hartmann y Donald Davis, investigadores del Instituto de Ciencias Planetarias de Tucson, quienes sugirieron que la Luna habría nacido a partir de la colisión entre una Tierra recién creada y un objeto con un tamaño comprendido entre el de la Luna y Marte. Dicha colisión vaporizó una parte de ambos cuerpos y homogeneizó sus composiciones. Los residuos formaron un disco protolunar alrededor de la Tierra y, con el paso del tiempo, se agregaron para dar lugar a la Luna. En las últimas décadas, este ha sido el escenario preferido para explicar el nacimiento de nuestro satélite, ya que permite explicar buena parte de las observaciones que las demás propuestas no pueden. No obstante, se trata en realidad de la «menos mala» de las hipótesis, ya que, como veremos, no está exenta de interrogantes.

La hipótesis dominante, que explica la formación de la Luna a partir de una colisión con un antiguo planeta, no está exenta de interrogantes

RECONSTRUCCIÓN DE TEA

A partir de los años ochenta, los planetólogos efectuaron simulaciones numéricas de la colisión contra Tea y confirmaron que la Luna pudo formarse así. Las restricciones que se imponían a estos modelos derivaban, principalmente, de la necesidad de obtener un momento angular adecuado y unas masas finales correctas para la Tierra y la Luna. Dichos requisitos podían satisfacerse considerando una colisión oblicua contra un objeto con una masa similar a la de Marte. En tal caso, Tea habría contribuido con un 10 por ciento a la masa de la Tierra y entre un 70 y un 90 por ciento a la de la Luna. Sin embargo, esas condiciones no permiten explicar que el material de ambos cuerpos se mezclase lo suficiente para dar lugar a las extraordinarias similitudes de composición que observamos hoy.

Los primeros análisis comparativos de los mantos terrestre y lunar, sobre todo en lo que respecta a las abundancias de oxígeno y sus isótopos, dieron paso a más conjeturas. Las composiciones resultaban parecidas, pero las incertidumbres eran también amplias. Desde hace una década, sin embargo, disponemos de datos cada vez más precisos, así como de información relativa a otros elementos. Esas mediciones han confirmado el parecido entre ambos astros. ¿Cómo explicarlo?

Son varias las hipótesis que se han planteado con el objetivo de reconciliar las observaciones con los resultados de las simulaciones. Si, por ejemplo, la heterogeneidad del sistema solar fuese menor de lo esperado, Tea podría haber tenido una composición más similar a la terrestre. Además, las simulaciones muestran que un cuerpo de constitución ligeramente distinta pudo intervenir en la formación de la Luna sin provocar variaciones detectables en las concentraciones isotópicas finales. En los próximos años, esperamos obtener datos adicionales sobre la composición de varios objetos del sistema solar, desde cometas y asteroides hasta otros planetas, como Venus y Mercurio. Eso nos permitirá conocer mejor la historia de los elementos y de su distribución en nuestro vecindario celeste.

Otra posibilidad es que la Luna se formase principalmente a partir del manto terrestre y no de Tea. Dicha hipótesis nos obliga a revisar las condiciones del proceso de colisión. Al respecto, un indicio prometedor llegó en 2012 gracias al trabajo de Matija Cuk, del Instituto SETI, en California, y Sarah Stewart,

Continúa en la página 70

NASA/CENTRO ESPACIAL JOHNSON, FOTOGRAFÍA S73-19456

Un pasado convulso

Se cree que nuestro satélite natural nació a partir de una colisión entre la Tierra primitiva, por entonces cubierta por un océano de Magma, y Tea, un objeto de masa planetaria y con un tamaño comprendido entre el de la Luna y Marte. Tras aquel choque, los escombros formaron un disco alrededor de la Tierra 1. Más tarde, se agregaron para dar lugar a la Luna, a una distancia de entre 3 y 5 radios terrestres. Los efectos de marea ralentizaron la rotación de la Tierra y alejaron progresivamente el satélite hasta su órbita actual, a unos 60 radios terrestres.

Después de su formación, la superficie de la Luna se encontraba cubierta por un océano de magma de varios centenares de kilómetros de profundidad 2. Posteriormente, ese magma se enfrió y cristalizó 3. Algunos elementos, entre ellos ciertos isótopos radiactivos, tienden a asociarse a la fase líquida del magma, por lo que habrían formado una capa densa bajo la corteza, sobre todo en la cara visible de la Luna (*página opuesta, arriba*). Se cree que esa capa rica en elementos radiactivos guarda relación con un episodio de vulcanismo tardío (*esta página, abajo*). Diversos indicios sugieren que, tras su formación, la Luna desarrolló un campo magnético global (*página opuesta, abajo*).

A lo largo de su historia, la Luna ha sufrido el bombardeo constante de meteoritos. El impacto que dio lugar al nacimiento de la cuenca de Aitken, en el hemisferio sur, también provocó que el eje de rotación se desviase unos 15 grados 4. El manto bajo las cuencas 5 derritió el basalto y las inundó con él, lo que dio lugar a los actuales mares de color oscuro. La formación del océano de las Tormentas (Oceanus Procellarum) también desplazó el eje de rotación unos 5 grados 6. Finalmente, los últimos bombardeos salpicaron de cráteres la superficie lunar hasta conferirle su aspecto actual 7.

1 Tierra cubierta por un océano de magma

Disco protolunar

2 Un océano de magma cubre la Luna



3 Cristalización de la corteza

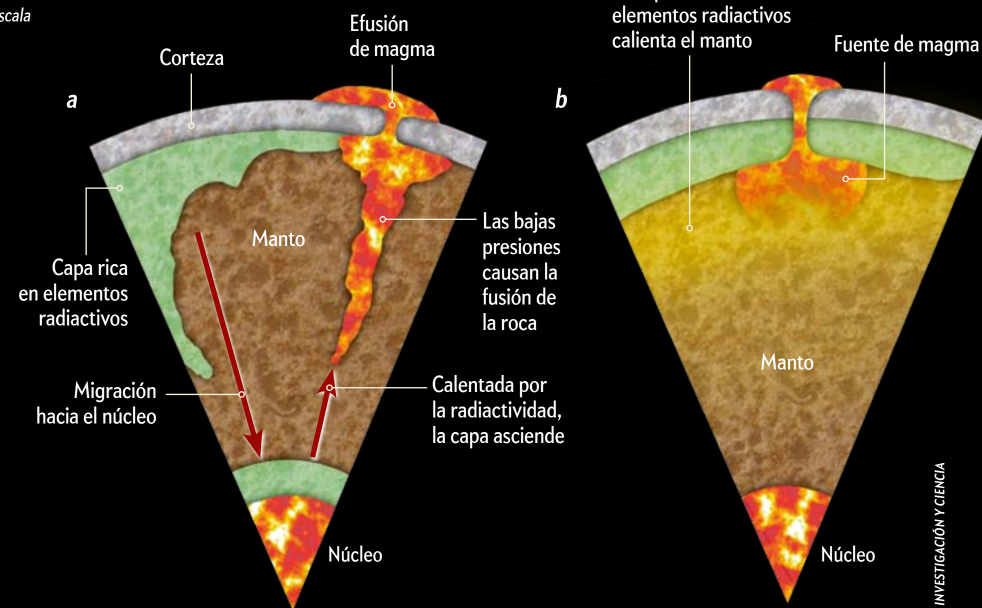


Hace 4500 millones de años

Los tamaños no se reproducen a escala

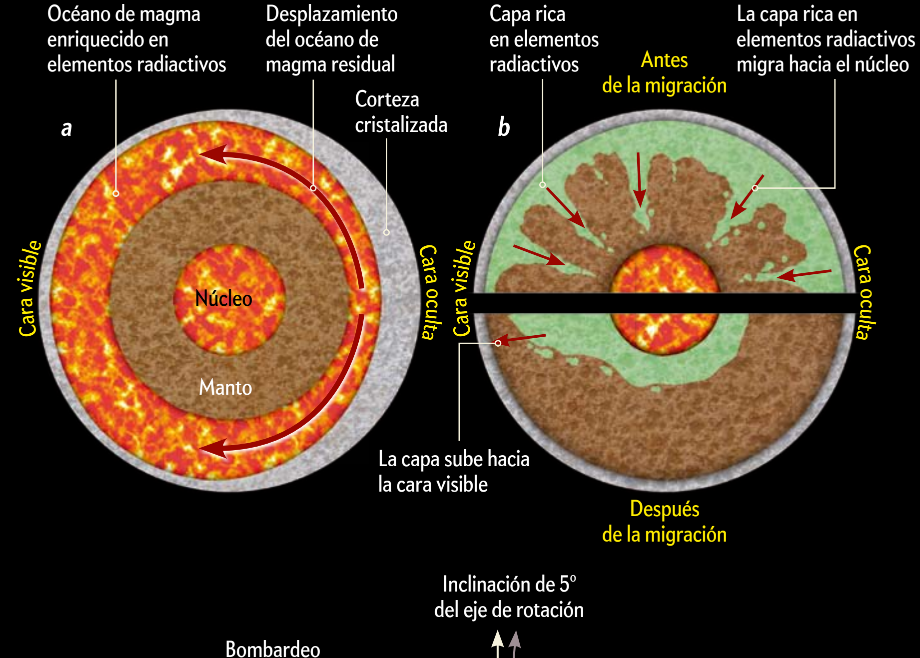
VULCANISMO TARDÍO

La superficie de la Luna muestra rastros de efusión de magma de menos de 100 millones de años de antigüedad. Para explicar una actividad volcánica tan reciente se han propuesto varios modelos. Durante la cristalización de la corteza (*gris*), se habría formado un capa rica en elementos radiactivos (*verde*). Dicha capa, más densa que el manto (*marrón*), pudo haberse hundido hasta llegar al núcleo (*a*). Al calentarse por efecto de la radiactividad se dilató, ascendió de nuevo y se fundió como consecuencia de la pérdida de presión. Según otra hipótesis, la capa rica en elementos radiactivos habría calentado la parte superior del manto hasta formar un magma que después escapó a la superficie (*b*).



UNA CORTEZA ASIMÉTRICA

Las caras visible y oculta de la Luna presentan composiciones distintas; en concreto, algunos elementos radiactivos abundan más en el hemisferio visible que en el opuesto. Dicha asimetría podría deberse a los procesos de cristalización (*a*): si la corteza del lado oculto solidificó antes, el magma residual (*naranja*) habría migrado hacia la cara visible, donde se enriqueció con elementos radiactivos. Sin embargo, la asimetría también pudo producirse después de la cristalización (*b*): la capa rica en elementos radiactivos (*verde*), más densa que el manto (*marrón*), se hundió hasta el núcleo y después ascendió preferentemente hacia la superficie visible. Por último, otra posibilidad es que una colisión distribuyese los elementos radiactivos de forma irregular.





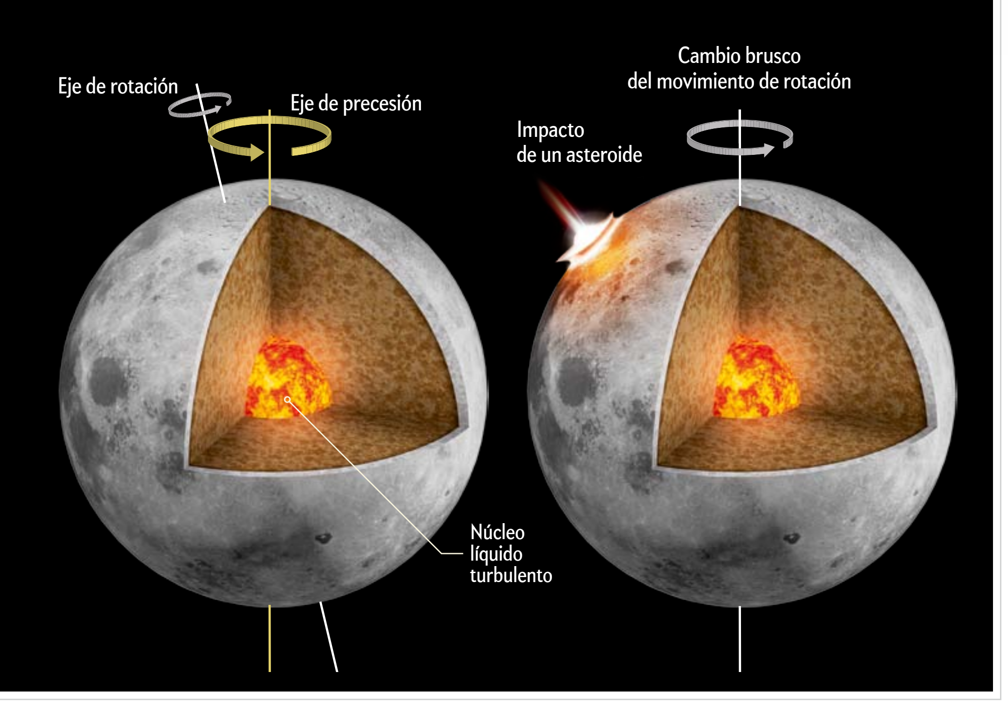






LA DINAMO LUNAR

La presencia de un campo magnético global requiere un núcleo líquido turbulento. En el caso de la Luna, las turbulencias pudieron aparecer debido a un intenso movimiento de precesión (el desplazamiento del eje de rotación, que describe un cono) sumado a una inclinación muy acusada y a una elevada velocidad de rotación (*a*). Otra posibilidad se basa en la «inestabilidad elíptica»: una variación en la velocidad de rotación del satélite causada por el impacto de un asteroide, unida a la geometría ligeramente ovalada de la Luna, debida a su vez a la atracción de la Tierra (*b*). Por el momento, los datos no permiten discriminar entre ambas posibilidades, que podrían también ser complementarias.



Viene de la página 67
por entonces en Harvard. Estos investigadores propusieron un mecanismo que permitía obtener una disminución progresiva del momento angular del sistema Tierra-Luna por efectos de resonancia gravitatoria entre la órbita de la Tierra en torno al Sol y la de la Luna alrededor de la Tierra. Gracias a ello, las restricciones sobre el momento angular en las simulaciones podían satisfacerse con condiciones menos estrictas, lo que dejaba la puerta abierta a un impacto más violento y a un momento angular inicial mayor. Ello ha dado lugar a toda una nueva generación de modelos, los cuales incluyen la posibilidad de una colisión frontal contra un objeto del tamaño de la Tierra, así como un impacto oblicuo entre un cuerpo menor y una Tierra que giraba sobre sí misma a gran velocidad.

La consecuencia principal de tales propuestas es que, en ellas, la nube de escombros a partir de la cual se forma la Luna proviene, sobre todo, del manto terrestre. Ello explicaría el parecido en la composición de ambos cuerpos y, al mismo tiempo, justificaría la cantidad relativamente baja de hierro en el interior del satélite, pues el hierro del núcleo terrestre se encontraría a demasiada profundidad para haberse mezclado con el resto del material liberado durante la colisión. Según otros modelos, la composición del disco de escombros resultante (el disco protolunar) sí pudo haber sido distinta de la terrestre. Sin embargo, varios procesos de interacción entre dicho disco y el océano de magma terrestre habrían homogeneizado ambos cuerpos a posteriori, sobre todo en lo que respecta a las abundancias de isótopos del oxígeno.

Pero los análisis isotópicos no se limitan al oxígeno. Las cantidades relativas de hafnio y wolframio, por ejemplo, proporcionan información sobre el momento en que se produjo el impacto. El hafnio 182 se transmuta en wolframio 182 con un período de semidesintegración de 8,9 millones de años, y la afinidad de estos elementos por el hierro permite utilizarlos como marcadores de la formación de los núcleos terrestre y lunar. Además, dado que resulta poco probable que las abundancias isotópicas de ambos mantos evolucionaran de manera independiente hacia el mismo valor, su comparación nos brinda información sobre el origen de los materiales que los componen.

En 2015, Mathieu Touboul, por entonces en la Universidad de Maryland, y sus colaboradores demostraron que la Tierra y la Luna sí presentan algunas diferencias en su composición isotópica, aunque su reducido valor sugiere que se deberían a procesos posteriores a la formación del satélite. En este sentido, un estudio más detallado nos ayudaría a entender mejor la relación entre la proto-Tierra, Tea y la colisión entre ambas.

Así pues, diferentes observaciones parecen converger hacia el escenario del impacto. Este permite explicar el parecido en las composiciones de la Tierra y la Luna, así como el momento angular del sistema, si bien aún quedan numerosas cuestiones por aclarar. Como veremos, la siguiente etapa en la historia geológica de la Luna nos obliga a plantearnos nuevas preguntas.

UNA CARA OCULTA DIFERENTE

Durante la acreción, los escombros procedentes del impacto hubieron de liberar grandes cantidades de energía debido a la conversión de la energía potencial gravitatoria en calor. Por tanto, una parte del material de la Luna debió de fundirse en un océano de magma global de varios centenares de kilómetros de profundidad. Al enfriarse, ese magma cristalizó con rapidez y formó una corteza compuesta principalmente de anortosita, una roca ígnea rica en feldespatos, la cual constituye las zonas más claras de la superficie lunar.

El modelo más simple para describir dichos procesos consiste en suponer que la cristalización fue homogénea en toda la superficie del astro. En tal caso, sin embargo, las propiedades de la corteza deberían de ser idénticas en todo el satélite, algo que no se observa: desde hace un tiempo sabemos que existe una gran

COMPOSICIÓN

El agua en la Luna

En 2008, Alberto Saal, de la Universidad Brown, y sus colaboradores demostraron la existencia de agua en ciertas muestras lunares que se creían deshidratadas. Estas observaciones pueden relacionarse con la cantidad de agua presente en el manto y el magma iniciales, cuya concentración se estima en unas 100 partes por millón.

También la superficie del satélite contiene agua. Las observaciones de la superficie lunar muestran que el hielo es estable en el tiempo geológico en las zonas de sombra permanente, cerca de los polos. La persistencia de ese hielo ha permitido aclarar varios aspectos de la historia lunar, como la evolución de su órbita y la inclinación de su eje de rotación.

La presencia de agua en el manto ejerce una fuerte influencia en la dinámica de sus rocas y, por tanto, ha de tenerse en cuenta en los modelos que intentan describir el campo magnético primordial y el vulcanismo tardío. El agua reduce la viscosidad de las rocas y provoca que la convección y, en consecuencia, el enfriamiento resulten más eficaces. En presencia de agua resulta difícil explicar cómo la Luna pudo mantener una actividad volcánica y magnética durante largos períodos de tiempo. El estudio de estos fenómenos es aún reciente y los modelos futuros habrán de integrar los nuevos datos.

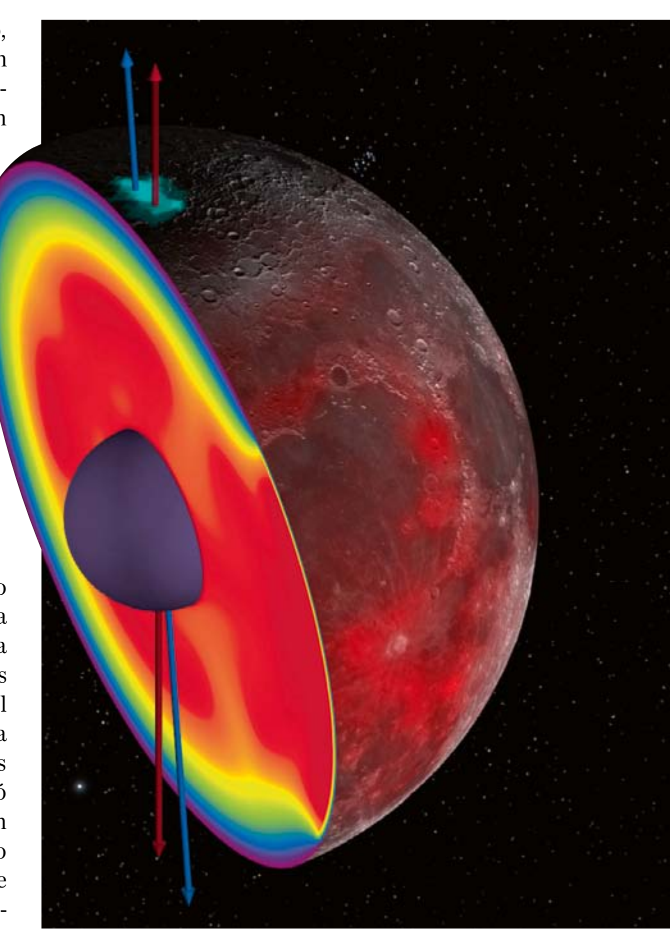
La importancia del agua se extiende a la formación de la Luna. Los modelos actuales muestran que la gestación del satélite por acreción a partir de un disco de escombros creado por un impacto gigante tendería a producir un astro pobre en elementos volátiles, como el hidrógeno, uno de los elementos que componen el agua. De esta manera, las observaciones recientes permiten imponer limitaciones más estrictas sobre los procesos de formación y, potencialmente, sobre el estado inicial de la Tierra.

Así pues, la cuestión del origen del agua lunar (si estuvo presente desde la formación del satélite o si fue aportada desde el exterior tras la acreción del material) se encuentra aún abierta. Se trata de un aspecto clave, ya que también nos ayudaría a entender el origen del agua en la Tierra. ¿Constituye la presencia de agua un fenómeno exótico, provocado en este caso por la colisión de objetos ricos en esta sustancia durante la época de formación de la Tierra, o se trata más bien un rasgo común? En tal caso, ¿deberíamos esperar encontrar agua en los planetas que orbitan en torno a otras estrellas?

asimetría entre las caras visible y oculta de la Luna. En concreto, los llamados elementos «incompatibles» —aquellos que tienden a permanecer en la parte líquida del magma durante la cristalización y, por tanto, se acumulan bajo la corteza— abundan en mayor medida en el lado visible del satélite.

Las observaciones efectuadas entre 2007 y 2009 por la sonda japonesa *Kaguya*, también conocida como *SELENE*, confirmaron esas diferencias. En concreto, la proporción entre las concentraciones de magnesio y hierro resulta ser mayor en la cara oculta que en la visible. Siendo un elemento incompatible, el hierro tuvo que escasear en las primeras rocas que cristalizaron en el océano de magma, lo que sugiere que la corteza se solidificó antes en la cara oculta que en la visible. El magma residual habría migrado entonces hacia el hemisferio visible, donde se habría enriquecido en elementos radiactivos. Aunque esta no constituye la única manera de explicar las observaciones, todo apunta a que hemos de abandonar los modelos más simples de formación de la corteza lunar.

Otra hipótesis plantea una cristalización simétrica, pero atribuye la abundancia de elementos incompatibles en la cara visible a una reorganización posterior en la estructura interna del satélite. En un primer momento, los elementos incompatibles habrían formado una densa capa global entre la corteza y el manto. Debido a ciertas inestabilidades hidrodinámicas, dicha capa se habría hundido hacia el núcleo, los elementos radiactivos que contenía se calentaron y, al dilatarse, su densidad disminuyó y subieron a la superficie. Las simulaciones numéricas revelan que esa migración no tuvo por qué ser simétrica, y que el ascenso de elementos incompatibles pudo tener lugar preferentemente en la cara visible. Más adelante veremos que este mecanismo reviste también importancia para explicar el vulcanismo tardío de la Luna. Por último, la asimetría de la corteza lunar pudo tener también un origen externo, como un gran impacto que alterase la composición del manto en un hemisferio pero no en el otro.



EJE CAMBIANTE: El eje de rotación de la Luna se ha desplazado varias veces a lo largo de su historia. Durante la formación del océano de las Tormentas (Oceanus Procellarum), una extensa región de basalto, el eje basculó unos 5 grados desde su orientación inicial (*azul*) hasta la actual (*rojo*).

M. A. SIEGLER ET AL.

POLOS Y CAMPO MAGNÉTICO

Tras la formación de la corteza, hace unos 4300 millones de años, la Luna aún presentaba un aspecto muy distinto del actual. Tras su constitución, nuestro satélite sufrió el bombardeado constante de meteoritos, lo que dejó su superficie salpicada de cráteres. Un suceso notable fue la colisión con el objeto que excavó la cuenca de Aitken, en el hemisferio sur, el mayor cráter de impacto conocido en todo el sistema solar. Como resultado, se calcula que el eje de rotación de la Luna se inclinó unos 15 grados.

Algo más tarde, hace entre 4100 y 3900 millones de años, los planetas terrestres del sistema solar experimentaron un intenso bombardeo de objetos, un episodio tal vez causado por una perturbación en el sistema de asteroides, los cuales habrían lanzado multitud de cuerpos menores hacia el sistema solar interior. Según dos modelos recientes de formación del sistema solar (el «modelo de Niza» y la hipótesis de la «Gran Virada», o *Grand Tack*), dicho fenómeno pudo obedecer a una acusada modificación en las órbitas de Júpiter y Saturno [*véase* «Nacido del caos», por Konstantin Batygin, Gregory Laughlin y Alessandro Morbidelli; Investigación y Ciencia, julio de 2016]. En el transcurso de este «Bombardeo Intenso Tardío», los meteoritos hubieron de excavar grandes cráteres en la corteza lunar. Estos se llenaron de lava basáltica que, al enfriarse, dio lugar a algunas de las zonas oscuras que hoy llamamos «mares».

En 2016, el autor de este artículo y otros investigadores mostramos que el eje de rotación de la Luna también se desplazó como consecuencia de varios procesos de evolución interna. Nuestro trabajo constató la existencia de dos regiones ricas en hidrógeno —un indicio de la presencia de hielo de agua—, una en las antípodas de la otra y desplazadas 5 grados con respecto a los polos actuales. Esas regiones fueron, muy probablemente, los polos del satélite hace miles de millones de años. La inclinación del eje se habría debido a la reorganización de la estructura interna que tuvo lugar durante la formación del océano de las Tormentas (Oceanus Procellarum, un gran mar de basalto) y la redistribución de masa asociada.

En este punto de su historia, la Luna ya se parecía al satélite que conocemos. Sin embargo, aunque los planetólogos comienzan a hacerse una idea clara de las grandes etapas geológicas en la evolución del satélite, nuestro vecino sigue asombrándonos. Una de las sorpresas llegó con el descubrimiento de que, en el pasado, la Luna tuvo un campo magnético. Hoy solo sobrevive un remanente de dicho campo en alguna de sus rocas, medido en 1998 por la sonda de la NASA *Lunar Prospector* y, más tarde, por *Kaguya*. Ese campo residual constituye un indicio a favor de la existencia de un campo global pasado. Hace poco, esta idea se ha visto reforzada gracias al análisis de muestras lunares con técnicas de alta precisión.

La presencia o ausencia de un campo magnético de cierta magnitud en un planeta o satélite proporciona valiosa infor-

mación sobre su funcionamiento interno y, por tanto, sobre su historia geológica. Los campos magnéticos planetarios aparecen como resultado del movimiento en el núcleo de un líquido conductor, por lo general hierro, lo que induce un efecto de dinamo. Dicho movimiento puede deberse a procesos de enfriamiento: de manera directa, por convección térmica; o indirecta, por fuerzas de empuje ligadas a la cristalización del núcleo interno sólido. Otra posibilidad consiste en una activación mecánica del movimiento debida a un cambio repentino en la dirección del eje de rotación del manto con respecto al del núcleo, lo que genera una rotación diferencial. Además, varios impactos de consideración en los albores de la historia lunar pudieron haber ejercido un efecto similar.

Las dinamos de origen mecánico aún no se conocen lo suficiente, pero los cambios en los parámetros orbitales necesarios para su funcionamiento no pueden explicar la existencia de un campo magnético durante más de 1000 o 2000 millones de años. Por tanto, es necesario recurrir a dinamos relacionadas con el enfriamiento y con la cristalización de la parte sólida del núcleo para dar cuenta de un campo magnético persistente. El campo terrestre, por ejemplo, depende sobre todo de los procesos de cristalización del núcleo interno. La existencia de un campo magnético en la Luna hace cerca de 4000 millones de años puede entenderse gracias al enfriamiento inicial del satélite, pero, a la vista del reducido tamaño de nuestro satélite, su intensidad y persistencia durante un largo período de tiempo resultan difíciles de explicar.

En 2009, Ian Garrick-Bethell, de la Universidad de California en Santa Cruz, examinó las muestras traídas por las misiones Apolo mediante técnicas más precisas que las usadas hasta entonces. Ello le permitió demostrar la existencia de un campo magnético superior a 1 microtesla hace 4200 millones de años (como referencia, la intensidad del campo terrestre es del orden de unos 50 microteslas). Cuando la roca fundida se enfrió, el momento magnético de sus átomos se alineó con el campo global, lo que dejó una impronta en la roca en forma de un campo magnético residual. Ese campo global habría perdurado varios cientos de millones de años, durante los cuales su intensidad varió en un par de órdenes de magnitud, entre 1 y 100 microteslas. Según algunos escenarios, el campo pudo haber persistido 2000 millones de años más. Sin embargo, las rocas lunares solo guardan un registro muy débil del campo magnético pasado, y los valores predichos por estos modelos se encuentran demasiado cerca del umbral de sensibilidad de los dispositivos como para detectarlos.

Así pues, parece que el campo magnético lunar experimentó en tiempos remotos un período breve de intensidad considerable, al que siguió un intervalo potencialmente largo de menor magnitud. ¿Cómo conjugar esa duración, intensidad y extrema variabilidad en los modelos de evolución interna de la Luna?

La presencia de agua en el manto, el crecimiento de un núcleo sólido, la tracción mecánica debida a las variaciones orbitales o una colisión con un asteroide han permitido explicar algunas observaciones, pero ninguno de estos fenómenos da lugar a un campo magnético de larga duración. Además, sigue abierta la cuestión de la intensidad. La magnitud del campo magnético en la superficie de un astro depende directamente del tamaño del núcleo que lo genera. Sin embargo, el antiguo campo magnético lunar habría alcanzado una intensidad equiparable a la que reviste el campo terrestre hoy, si bien el núcleo del satélite probablemente sea diez veces menor que el de nuestro planeta.

Aún estamos lejos de escribir la historia completa del campo magnético lunar. En este sentido, una mejor comprensión de la estructura interna y la evolución del manto permitiría imponer restricciones más estrictas sobre los modelos. Y una mayor cobertura temporal de los datos, incluida la determinación del período en que la dinamo se detuvo, sería también una gran baza a la hora de concebir escenarios plausibles.

VULCANISMO TARDÍO

Otro aspecto de la ciencia lunar que las observaciones de los últimos años nos han obligado a reconsiderar es el de su actividad magmática. En 2014, gracias a las imágenes de alta resolución obtenidas por la sonda de la NASA *Lunar Reconnaissance Orbiter*, Sarah Braden, de la Universidad estatal de Arizona, y sus colaboradores refirieron el hallazgo de casi 70 anomalías topográficas muy similares a estructuras volcánicas con marcas de flujos de lava. Para datarlas, los investigadores se basaron en la cantidad de cráteres de meteoritos que cubrían esas regiones: su bajo número sugiere que las formaciones volcánicas serían muy recientes, con una edad inferior a los 100 millones de años. Si estos datos se confirman, será necesario entender qué mecanismo generó el calor que alimentó esos volcanes, ya que la mayoría de los modelos solo dan cuenta de un vulcanismo de más de 1000 millones de años de antigüedad.

Entre los modelos que arrojan una resultado más acorde de la duración del vulcanismo lunar y su distribución sobre la superficie del satélite, dos escenarios apuntan a una fuerte correlación entre la actividad volcánica y la composición de Procellarum KREEP Terrane, una región de la cara visible muy abundante en elementos radiactivos (el acrónimo KREEP

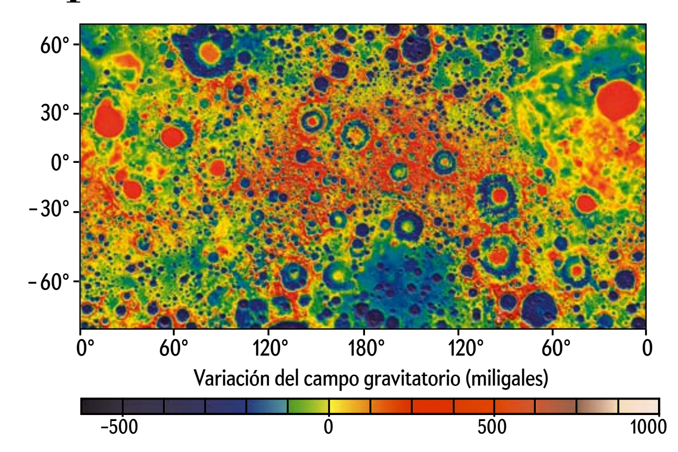
VULCANISMO RECIENTE: Ina, una caldera de lava basáltica de unos 2 kilómetros de largo, fue fotografiada por primera vez por el *Apolo 15*. Con una edad estimada en unos 100 millones de años, durante largo tiempo se pensó que se trataba de una anomalía. Años más tarde, sin embargo, la sonda *Lunar Reconnaissance Orbiter* permitió identificar 70 estructuras similares: un indicio de que la Luna presentó actividad volcánica hasta hace muy poco.

NASA/CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES/UNIVERSIDAD ESTATAL DE ARIZONA

Sondas gemelas para explorar la corteza lunar

En 2012, la NASA puso las sondas gemelas *GRAIL* en órbita alrededor de la Luna. Al medir las ligeras variaciones de distancia entre las naves, las cuales seguían una trayectoria común, los investigadores lograron obtener un mapa gravimétrico extraordinariamente preciso del satélite. Combinadas con datos topográficos, estas observaciones permitieron mejorar de manera considerable el conocimiento de la corteza lunar.

Las propiedades globales de la corteza se deben al proceso de cristalización del océano de magma y a la composición de la Luna. Los datos sugieren que su densidad media sería menor de lo que se pensaba hasta entonces; su espesor, de entre 34 y 43 kilómetros, sería por tanto mayor de lo esperado. Otra consecuencia directa de las observaciones es que la Luna tendría una concentración de elementos refractarios (entre ellos, varios elementos radiactivos) similar a la de la Tierra.



MAPA GRAVIMÉTRICO de la Luna obtenido por las sondas GRAIL. Gracias a él pueden identificarse cráteres y cuencas; allí donde la corteza es más delgada, el campo gravitatorio es menos intenso (*azul*), mientras que en las elevaciones el campo resulta mayor (*rojo*).

especifica los elementos en cuestión: potasio, tierras raras y fósforo). Ambos modelos difieren en la interpretación que hacen del enriquecimiento de la zona con dichos isótopos: ¿fueron causa o consecuencia de la actividad volcánica?

Los isótopos radiactivos pertenecen a la clase de elementos incompatibles que mencionábamos más arriba, los cuales permanecen en el océano de magma residual durante la cristalización. Tras su enfriamiento, se habrían acumulado en una capa más densa que el manto subyacente, lo que dio lugar a una estructura inestable. Llegados aquí hemos de volver a echar mano del escenario propuesto para explicar la asimetría de la corteza lunar: dicha capa se habría hundido en el manto y más tarde habría ascendido de nuevo, aunque sobre todo en el lado visible, principalmente en la región de Procellarum. Al subir, la pérdida de presión habría fundido la capa y causado el vulcanismo de la zona. Uno de los éxitos de este modelo es la datación de los acontecimientos: según él, las calderas más antiguas no tendrían más de 300 millones de años. Sin embargo, la composición de la lava predicha por este modelo no se corresponde de manera directa con las observaciones. En concreto, esperaríamos que los basaltos fuesen ricos en elementos incompatibles, lo que claramente no es el caso.

Otra hipótesis considera que la abundancia de elementos radiactivos pudo ser lo que generó la actividad volcánica. Si, durante su reorganización interna, los elementos incompatibles se acumularon en la región de Procellarum, la zona se habría calentado hasta derretir la parte superior del manto y generar una actividad volcánica local. El proceso se habría extendido durante un período de tiempo correspondiente al que indican las observaciones de los primeros flujos de lava. El estudio de las muestras de la superficie lunar sugiere que los elementos radiactivos se mezclaron sobre todo en la corteza y que habrían estado poco presentes en los flujos de lava, lo que refuerza esta versión de la historia lunar.

Sin embargo, ninguno de los dos escenarios puede considerarse completamente satisfactorio. En el primer caso, las condiciones para explicar la migración de los elementos radiactivos resultan inciertas; como hemos visto, no existe ningún mecanismo universalmente aceptado para dar cuenta del heterogéneo reparto de los elementos sobre la superficie lunar. Y un mecanismo de este tipo también resulta necesario en el segundo modelo. Por último, la evolución del manto tiene consecuencias directas sobre el núcleo y, por tanto, sobre el campo magnético.

¿Nos depara más sorpresas la historia de nuestro satélite? Puede que el renovado interés que hoy vive la exploración lunar nos brinde pronto nuevas respuestas. A pesar de los grandes avances logrados durante las últimas décadas, las observaciones delatan una imagen incompleta en la que las piezas no siempre encajan bien. Y la Luna, durante tanto tiempo considerada un astro inerte y con una historia carente de interés, se nos revela hoy como un cuerpo celeste activo y lleno de intriga. IyC

PARA SABER MÁS

Making the Moon from a fast-spinning Earth: A giant impact followed by resonant despinning. Matija Cuk y Sarah T. Stewart en *Science*, vol. 338, n.º 6110, págs. 1047-1052, noviembre de 2012.
Asymmetric crustal growth on the Moon indicated by primitive farside highland materials. Makiko Ohtake et al. en *Nature Geoscience*, vol. 5, págs. 384-388, junio de 2012.
The lunar dinamo. Benjamin P. Weiss y Sonia M. Tikoo en *Science*, vol. 346, n.º 6214, diciembre de 2014
Tungsten isotopic evidence for disproportional late accretion to the Earth and Moon. Mathieu Touboul et al. en *Nature*, vol. 520, págs. 530-533, abril de 2015.
Lunar true polar wander inferred from polar hydrogen. M. A. Siegler et al. en *Nature*, vol. 531, págs. 480-484, marzo de 2016.
Vídeo de la NASA que resume la historia de la Luna: **http://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=10930**

EN NUESTRO ARCHIVO

La nueva Luna. Paul D. Spudis en *IyC*, febrero de 2004.
La Luna de las dos caras. P. Surdas Mohit en *IyC*, septiembre de 2008.





DEFENSOR DE LA NATURALEZA

TRACIE CHING

Richard Schiffman es periodista especializado en medioambiente.

CONSERVACIÓN

El paleontólogo y ahora político Richard Leakey dirige la lucha contra la caza furtiva que se libra en Kenia

Richard Schiffman

El 30 de abril de 2016, el presidente de Kenia, Uhuru Kenyatta, prendió fuego a una montaña de cuernos de rinoceronte y colmillos de elefante que habían sido decomisados en todo el país. Era la mayor incineración hasta la fecha: ardieron 105 toneladas de marfil valoradas en 100 millones de dólares y 1,3 toneladas de cuernos por valor de otros 67 millones. En cierto modo, la quema era el funeral por los más de 6000 paquidermos y 300 rinocerontes exterminados por los contrabandistas. Aún más importante, era una clara señal de advertencia de que esos artículos solo poseen valor cuando forman parte de los animales vivos, ya que estos atraen al turismo y desempeñan funciones capitales en el mantenimiento de los ecosistemas.

Colmillo a colmillo, cuerno a cuerno, África ve desaparecer a su fauna más emblemática. El censo del elefante africano se ha desplomado un 62 por ciento en la última década, principalmente a manos de los cazadores furtivos, mientras hoy apenas sobreviven 29.000 rinocerontes de los 70.000 que se estima vivían en 1970. Por desgracia, no son las únicas víctimas. El número de leones ha descendido un 43 por ciento en los últimos veinte años; las jirafas, censadas en 140.000 en 1999, han declinado hasta 80.000, y la lista no cesa aquí.

Para acabar con la matanza, en abril de 2015 Kenyatta puso a Richard Leakey al frente del Servicio de Fauna Silvestre de Kenia (KWS, por sus siglas en inglés). No era la primera vez que nuestro entrevistado formaba parte del organismo. En 1989 ya fue nombrado director del entonces joven servicio. Hasta aquel momento era conocido por sus descubrimientos de fósiles humanos, pero pronto se granjeó una reputación de servidor público insobornable y combativo. Dimitió en 1994, tras acusar de corrupción a altos cargos del Gobierno del presidente Daniel Arap Moi.

El desafío que supone ahora la conservación de la fauna es mayor si cabe. Los elefantes, los rinocerontes y otros animales soportan una presión cinegética más intensa que nunca, ejercida por bandas organizadas que compiten por satisfacer la pujante demanda de Asia de artículos zoológicos.

Nuestra revista entrevistó a Leakey, de 72 años, en la Universidad Stony Brook en Long Island, donde ocupa el cargo de director del Instituto de la Cuenca del Turkana, acerca de su labor en pos del patrimonio natural de Kenia.

La entrevista ha sido editada en aras de la claridad.

—La Redacción

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA: ¿Por qué usted, como heredero de la gran dinastía de paleontólogos, se ha volcado en la conservación?

RICHARD LEAKEY: Cuando estudiaba fósiles, trataba con especies que se extinguieron a causa del cambio climático y de la caza excesiva. Hoy, admirar el espléndido paisaje de Kenia con tantos de sus sucesores, los supervivientes (que hoy son especies distintas), supone para mí una experiencia catártica. Con ellos, me siento en casa. Me entiendo mejor a mí mismo. Soy consciente de mi lugar en el gran devenir de la vida. La paleontología no es algo desligado de mi preocupación por la fauna, sino que forma parte de ella.



EN LLAMAS: Un guarda forestal del Parque Nacional de Nairobi contempla las hogueras de colmillos de elefante decomisados, el 30 de abril de 2016.

Como director del Servicio de Fauna de Kenia entre 1989 y 1994, persiguió con afán la corrupción en las filas del organismo y armó a los guardas para hacer frente a la oleada de cazadores furtivos de marfil que en aquel momento saqueaban Kenia.

Esto tuvo algunas consecuencias en el mercado. Mi idea fue quemar el marfil decomisado. Ello dio una enorme publicidad al exterminio de que eran víctima los elefantes por sus colmillos, lo que impulsó a la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, por sus siglas en inglés) a imponer un veto internacional al comercio de marfil. La prohibición tuvo una gran repercusión. El número de paquidermos muertos en Kenia pasó de miles cada año a un escaso centenar a finales de 1990, y permaneció así de bajo por lo menos otros diez años.

¿Qué ha sucedido para que el furtivismo se haya recrudecido hasta el extremo que hoy vemos en gran parte de África?

Si bien la caza ilegal decayó, en los almacenes quedó depositada una gran cantidad de marfil, y algunos países (Sudáfrica sobre todo, pero también Botsuana, Namibia o Zimbabue) se vieron tentados a ponerla en circulación como fuente de ingresos. Convencieron a CITES para que autorizara su venta. En Kenia pensábamos que una vez que el comercio se reanudara, sería muy difícil que la gente pudiera distinguir entre un documento de exportación legal y uno falso. Ello provocó el fuerte repunte de la caza y que su botín se exportara con documentación manipulada. El precio subió por las nubes y las grandes organizaciones delictivas comenzaron a interesarse por él. Fue una situación deplorable.

Para afrontar esta crisis, el año pasado le invitaron a dirigir el KWS. ¿Por qué aceptó el nombramiento?

El presidente prometió que el comité y yo gozaríamos de amplia libertad para tomar decisiones, sin la interferencia política de los altos funcionarios corruptos. Cuando ocupé el puesto de director, la moral en el servicio estaba por los suelos. Ahora estamos comenzando a ver a las personas adecuadas hacer lo correcto porque se sienten seguras; nadie va a entorpecer su labor. En los últimos once meses, Kenia ha perdido 94 elefantes, en contraste con los cientos muertos en el mismo período del año pasado. Se ha revisado la Ley de Fauna Salvaje de Kenia para mejorar la gestión de los servicios de protección de la naturaleza, se han contratado 1000 guardas forestales más y se han endurecido las penas por furtivismo. En este momento se está reclutando y adiestrando un organismo especial de fiscales especializados en protección ambiental. Además, estamos renovando el parque móvil del personal y reparando las carreteras; y estamos facilitando a nuestros trabajadores alojamiento decente sobre el terreno, y proporcionándoles atención sanitaria y nuevo equipamiento para combatir la caza ilegal.

Para proteger a la fauna, también necesitarán la implicación de la ciudadanía. ¿Qué se está haciendo en este sentido?

En las últimas décadas, National Geographic, la BBC y otros grandes grupos de comunicación han estado produciendo documentales sobre la fauna africana dirigidos a su audiencia en el extranjero: ninguna de esas filmaciones se ha emitido en Kenia, nunca. WildlifeDirect, una organización sin ánimo de lucro fundada por mí, convenció a algunas productoras para que nos cedieran de forma gratuita esos documentales. Desde enero de 2016, se están emitiendo cada sábado a las 8 de la tarde. Cada vez que se televisan ocupan el primer puesto en las redes sociales del país. WildlifeDirect también produce el progama *NTV Wild Talk*, que se emite la noche de los martes. Se trata de las primeras filmaciones de factura africana sobre naturaleza. En Kenia habrá pronto una parte de la ciudadanía que apreciará tanto nuestra fauna como los espectadores de Londres, París o Nueva York.

La razón habitual para justificar las reservas de caza en África es que atraen divisas extranjeras de la mano de los turistas. ¿Es esa la idea del KWS?

Los kenianos comienzan a ser conscientes de que es preciso cambiar por entero nuestra visión de la naturaleza. En la actualidad el turismo es un elemento importante de nuestro porvenir económico. Pero es caprichoso, y como mucho representa una ayuda a medio plazo, porque el sector industrial acabará tomando el relevo en el progreso de la nación. Sin embargo, mucha gente comienza a reconocer que todo país necesita espacios vírgenes donde pueda tomarse un respiro y gozar de la belleza natural. Ahora se los comienza a ver como un patrimonio nacional de valor incalculable. Y eso a largo plazo es mucho más importante que el turismo.

¿Y qué me dice de los habitantes de los poblados que viven en peligrosa vecindad con la fauna?

La población de Kenia se ha triplicado. La gente se está desplazando hacia las zonas

CARL DE SOUZA, GETTY IMAGES

habitadas por los animales. Han aumentado las muertes por ataques de elefantes, búfalos y cocodrilos; los cultivos quedan arruinados y entre la gente existe cierto sentimiento de acritud hacia los animales. Estoy convencido de que hemos de vallar los parques nacionales para que los animales en libertad no puedan irrumpir en los campos y para que los rebaños domésticos de cabras y vacas no puedan adentrarse en sus dominios.

Esa es una propuesta bastante radical.
Sin duda, pero tal vez sea la única que funcione. La técnica del vallado está muy avanzada, pero resulta cara. Vamos a solicitar préstamos en condiciones favorables, con un bajo interés y devolución en plazos de más de treinta años, concedidos por instituciones internacionales como el Banco Mundial. El cerramiento reduciría el furtivismo, pues a menudo los cazadores ilegales se hacen pasar por pastores aprovechando los rebaños que vagan por la periferia de los parques. Nos va a llevar de tres a cinco años, pero cuando lo hayamos logrado, la gente lo aprobará; aunque de momento nos dicen que estamos locos.

Los habitantes de la Kenia rural casi no reciben compensaciones por el turismo de safari. En Namibia y Botsuana, las reservas gestionadas por las comunidades locales se han ganado el apoyo de la gente. ¿No cree necesario implicar a la ciudadanía de a pie en la protección de la naturaleza?
Por supuesto, uno tiene que contar con el apoyo de la población. Pero si eso se hace cuando se disfruta de un *boom* turístico, por el que la gente que vive en la vecindad de los parques obtiene un rédito y sus niños acuden a la escuela, ¿qué sucederá cuando el turismo decaiga y, por desgracia, se vean obligados a sacar a sus niños de las escuelas? A mi juicio, el dinero del turismo debe ir a parar a las arcas del Gobierno central, desde donde debe ser redistribuido mediante la construcción de mejores hospitales, carreteras e infraestructuras para toda la ciudadanía. No es justo que solo se destine a sostener temporalmente a quienes viven cerca del parque.

¿No ve un conflicto en el uso de fondos públicos para proteger la fauna cuando tantos conciudadanos viven en la pobreza?
Cuando era secretario del Consejo de Ministros, cada elemento del presupuesto destinado a la maquinaria del Estado pasaba por mi mesa. Y muchos de mis antiguos colegas de profesión me decían: «¿No podrías asignar un poco más a nuestra dotación presupuestaria? Sería de mucha ayuda». Y tuve que decirles: «No puedo, sería inmoral. Hay demasiada gente cuyos hijos no van a la escuela, que carecen de vacunas, de agua, de una vivienda digna; no puedo desviar dinero destinado a ellos para asignarlo a conservar la naturaleza». Fue duro hacer eso durante dos años.

Ahora está en el bando opuesto.
Sí, pero aprecio lo mucho que importa ayudar a los ciudadanos. Si no se pone coto a la pobreza, no habrá seguridad para nadie en nuestra sociedad: ni seguridad institucional, ni seguridad nacional, ni mucho menos seguridad para nuestros territorios naturales y nuestra fauna. Los parques nacionales están ahí para el bien de todos. El dinero generado por ellos debe ser destinado a ayudar a todos los kenianos a tener una mejor educación, mejores carreteras e infraestructuras, y a gozar de una vida más prospera y longeva.

Mombasa, la segunda ciudad del país, quizá sigue siendo la principal puerta de salida del marfil ilegal desde África oriental hacia Asia. ¿Qué está haciendo el Gobierno de Kenia para evitarlo?
Hoy por hoy, el grueso del marfil que sale oculto a través de Mombasa no es de origen keniano, sino tanzano; procede de África central. El primer objetivo que me propuse fue detener el exterminio de los elefantes en Kenia, y lo hemos conseguido. Poner freno al contrabando no es competencia del KWS, pero se sigue trabajando en ello. La Autoridad Portuaria en Mombasa ha depurado recientemente a su plantilla, de arriba a abajo. Ahora cuenta con una unidad aduanera completamente nueva, así como nuevas unidades de gestión de contenedores y de muelles. De momento, todo parece marchar bien.

En la vecina Tanzania se ha proyectado una autopista que atravesará la llanura del Serengeti. Algunos ambientalistas aseguran que supondrá el fin para la mayor migración animal del planeta. Pero usted la aprueba.
El Serengeti es un ecosistema fabuloso que debe ser preservado a toda costa, pero hemos de ver el problema con realismo. El Serengeti está rodeado también de poblaciones en expansión. Se prevé que las localidades a las que prestará servicio esta vía se convertirán en una metrópolis con más de tres millones de habitantes. Tanzania acabará de construir un segundo puerto en la próxima década. Claramente tienen en su punto de mira —como nosotros, aquí en Kenia— el comercio con África central. Por eso es necesaria la carretera. Así que sí, estoy a favor del corredor viario a través del Serengeti. Pero 40 kilómetros de la autopista deberán alzarse a 30 metros del suelo para que la fauna pueda transitar sin obstáculos por debajo.

¿Cuál es su mayor preocupación?
El cambio climático. Es aterrador. Me preocupa seriamente que con el crecimiento de la población y el desarrollo desenfrenado alrededor de los parques estemos creando «islas» de vida salvaje. Y si uno se fija en el registro paleontológico, observará que cuando ha habido un cambio climático las especies se han extinguido mucho antes en las islas que en tierra firme, pues desde ellas no tienen lugar adonde migrar. Si sobreviene una sequía pertinaz y los abrevaderos naturales del parque se secan, la fauna no tendrá adonde ir. No estoy seguro de lo que podremos hacer en el futuro ante la escasez de agua y las lluvias menguantes.

Brad Pitt le encarnará en una película acerca de su vida. ¿Qué opina?
Siempre he deseado una película donde se diera a conocer la crítica situación que atraviesan los elefantes y los rinocerontes. Si el público ve a Brad Pitt luchando para salvarlos, decenas de millones de personas le creerán, también en China.

Así que la voz de Brad Pitt en el papel de Richard Leakey será más clamorosa que la del propio Richard Leakey.
¡Mil veces más! IyC

PARA SABER MÁS

Wildlife wars: My fight to save Africa's natural treasures. Richard Leakey y Virginia Morell. St. Martin's Press, 2001.

Wildlife protection and trafficking assessment in Kenya: Drivers and trends of transnational wildlife crime in Kenya and its role as a transit point for trafficked species in east Africa. Sam Weru. TRAFFIC Report, mayo de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

La senda del marfil. S. K. Wasser, B. Clark y C. Laurie en *IyC*, marzo de 2010.


DOS CIENTÍFICOS extraen un testigo de permafrost de un metro de longitud en el lago Eight Mile, cerca de Healy, Alaska, en septiembre de 2016. El color oscuro y la textura (*página siguiente*) indican que el suelo presenta un alto contenido de materia orgánica que, al descomponerse, liberará gases de efecto invernadero.



CAMBIO CLIMÁTICO

LA PREDICCIÓN DEL PERMAFROST



La descongelación de la tundra ártica probablemente acelerará el cambio climático durante al menos un siglo. La pregunta es: ¿en qué medida?

Ted Schuur

EN SÍNTESIS

El permafrost (suelo congelado durante todo el año) se está descongelando en todo el Ártico. La descomposición microbiana de los restos de plantas y animales contenidos en un suelo cada vez más caliente libera a la atmósfera dióxido de carbono y metano.

La vasta región de permafrost del hemisferio norte contiene cerca de 1,45 billones de toneladas métricas de carbono orgánico, casi el doble del carbono existente en la atmósfera terrestre.

Los datos procedentes de numerosos sensores indican que entre el 5 y el 15 por ciento de ese carbono podría liberarse durante este siglo. La emisión del 10 por ciento representaría la incorporación a la atmósfera de entre 130.000 y 160.000 millones de toneladas de carbono, con la consiguiente aceleración del calentamiento global. El mejor modo de evitar que aumente la temperatura del permafrost es reducir el calentamiento general del planeta.

FOTOGRAFÍAS DE BRIAN ADAMS

Ted Schuur es profesor de ecología de ecosistemas en la Universidad de Arizona del Norte. Realiza investigaciones de campo en el Ártico desde hace casi dos décadas. También es director de investigación en la Red del Carbono del Permafrost, un consorcio internacional que integra nuevos hallazgos relacionados con el carbono del permafrost y el clima.





El sólido bloque de 20 kilogramos de nieve endurecida y hielo que intento sujetar se escapa de mis guantes de goma y vuelve al largo surco que estoy excavando en la nieve, donde aterriza con un crujido. De rodillas al borde de la zanja, me enderezo para recobrar el aliento y arquear mis doloridas lumbares, protegidas por un cinturón de halterofilia. En este día frío y radiante del interior de Alaska retiro toneladas de nieve, en colaboración con otros cinco científicos, a lo largo de la cuarta de seis vallas dispuestas en una suave pendiente de la tundra. La nieve la sacamos de allí en trineos. Nuestra labor forma parte de un experimento diseñado con el fin de calentar el suelo y simular así las repercusiones que el cambio climático podría tener en este remoto paraje, a las afueras del Parque Nacional Denali.

Estamos a comienzos de abril y a mi equipo le está costando más de una semana retirar la nieve compactada que el viento ha acumulado a lo largo de las vallas que instalamos cada otoño en este lugar. Cada valla mide aproximadamente un metro y medio de altura y ocho de longitud. El volumen adicional de nieve actúa como un manto que aísla el suelo del gélido aire del invierno y mantiene más caliente de lo habitual la superficie del permafrost (suelo que, por lo común, permanece congelado todo el año). Retirar el exceso de nieve tiene como objeto que los efectos de la primavera se manifiesten en nuestras parcelas experimentales al mismo tiempo que en la extensión de tundra circundante, y que no se infiltre en el terreno ningún aporte adicional de agua de fusión que altere el suelo y lo diferencie del resto de la región.

Mantener el suelo congelado a mayor temperatura durante el invierno trae consigo una descongelación estival más temprana e intensa. Este comportamiento es exactamente el que espera observarse a medida que las temperaturas aumenten tanto en el Ártico como en los ecosistemas boreales subárticos, aumento que ya ocurre a una velocidad dos veces superior a la de la creciente media global. Dado que el permafrost se compone de material rocoso, suelo congelado y hielo, su calentamiento implica su descongelación, no su derretimiento. Se ablanda sin volverse líquido, como un trozo de carne sacado del congelador. Cuando el permafrost se descongela, los microorganismos previamente congelados se reactivan y descomponen los restos de plantas y animales que se han acumulado en el suelo a lo largo de cientos y miles de años. Como resultado, se liberan dióxido de carbono y metano.

Las regiones de permafrost que rodean la parte norte del planeta contienen tal volumen de materia orgánica que la liberación de una mera fracción de ella en forma de gases de efecto invernadero aceleraría drásticamente el cambio climático. Nuestro experimento en Alaska constituye una fase importante dentro de una investigación de carácter mundial cuyo objetivo es dilucidar el posible alcance de ese efecto en las próximas décadas. Ya estamos empezando a saber lo suficiente como para hacer predicciones robustas.

POSIBLE DESCONGELACIÓN MASIVA

¿Cómo podríamos cuantificar cuánto permafrost se descongelará, a qué velocidad lo hará y cuánto influirán las correspondientes emisiones de carbono en el calentamiento global? La cuantificación tendría que evaluar una extensa parte del planeta: las regiones de permafrost abarcan 16,7 millones de kilómetros cuadrados del hemisferio norte, lo que representa casi la cuarta parte del área que no está cubierta de hielo. Y el suelo congelado alcanza profundidades de entre decenas y centenares de metros. (Gran parte de las latitudes altas del hemisferio sur se





VARIOS SENSORES contenidos en cámaras blancas cerca de la cordillera de Alaska registran la cantidad de dióxido de carbono absorbida y liberada por el suelo (*1*). La investigadora Meghan Taylor, de la Universidad de Arizona del Norte, recoge los datos (*2*).

hallan cubiertas por océanos o casquetes glaciares, por lo que la extensión del permafrost austral es menor.)

Aunque los satélites y los sistemas de teledetección pueden registrar con precisión los cambios que experimentan casquetes glaciares como el de Groenlandia, no existe un amplio sistema de detección remota aplicado a las regiones de permafrost. Durante años, los científicos han empleado sensores terrestres instalados en determinadas áreas de permafrost, pero no contaban con suficientes puntos de estudio a nivel global. Sin embargo, el número de sensores ha aumentado progresivamente. Hoy, la Red Terrestre Mundial para el Permafrost monitoriza más de 1000 perforaciones provistas de instrumentos que registran las temperaturas tanto en los metros más superficiales del suelo como en el subsuelo profundo.

Esta red ha demostrado que el permafrost se ha calentando gradualmente a lo largo de las últimas décadas, y que en 2014 y 2015 alcanzó nuevos máximos en numerosos puntos. Los mayores incrementos térmicos se han observado en las zonas donde el suelo ha estado históricamente muy frío, a temperaturas de entre –10 y –5 grados Celsius. También hemos observado aumentos de temperatura en zonas de permafrost que se hallan más próximas al punto de congelación, entre –2 y 0 grados, donde una variación de un grado puede ejercer un gran impacto. En algunos puntos donde el permafrost se encuentra justo por debajo de 0 grados se ha detectado un engrosamiento de la capa activa, la porción de suelo que se descongela en verano y vuelve a congelarse en invierno. Al relacionar entre sí los datos procedentes de distintas partes del mundo, podremos comprender mejor las variaciones de temperatura en el suelo ártico.

Pero nuestro análisis no se limita a calcular el volumen de permafrost que podría descongelarse. También necesitamos conocer la cantidad de materia orgánica contenida en el suelo reblandecido. La pasada primavera, en el área de investigación del lago Eight Mile, mi equipo perforó el terreno y extrajo testigos de suelo de 1,5 metros de profundidad, tal y como hemos hecho en distintos años desde que comenzó el proyecto hace más de una década. Los datos relativos a la tundra, obtenidos tanto por nosotros como por otros investigadores, demuestran que un metro cúbico del suelo más superficial contiene cerca de 50 kilogramos de carbono orgánico; es decir, carbono de organismos parcialmente descompuestos pero congelados (este se diferencia del carbono inorgánico que compone el material rocoso, el cual difícilmente se verá afectado por las variaciones de temperatura). Se trata de una cantidad 5 veces superior a la del carbono contenido en los suelos de la misma región que no son permafrost, y 100 veces superior al almacenado en arbustos y otras plantas que subsisten en el Ártico.

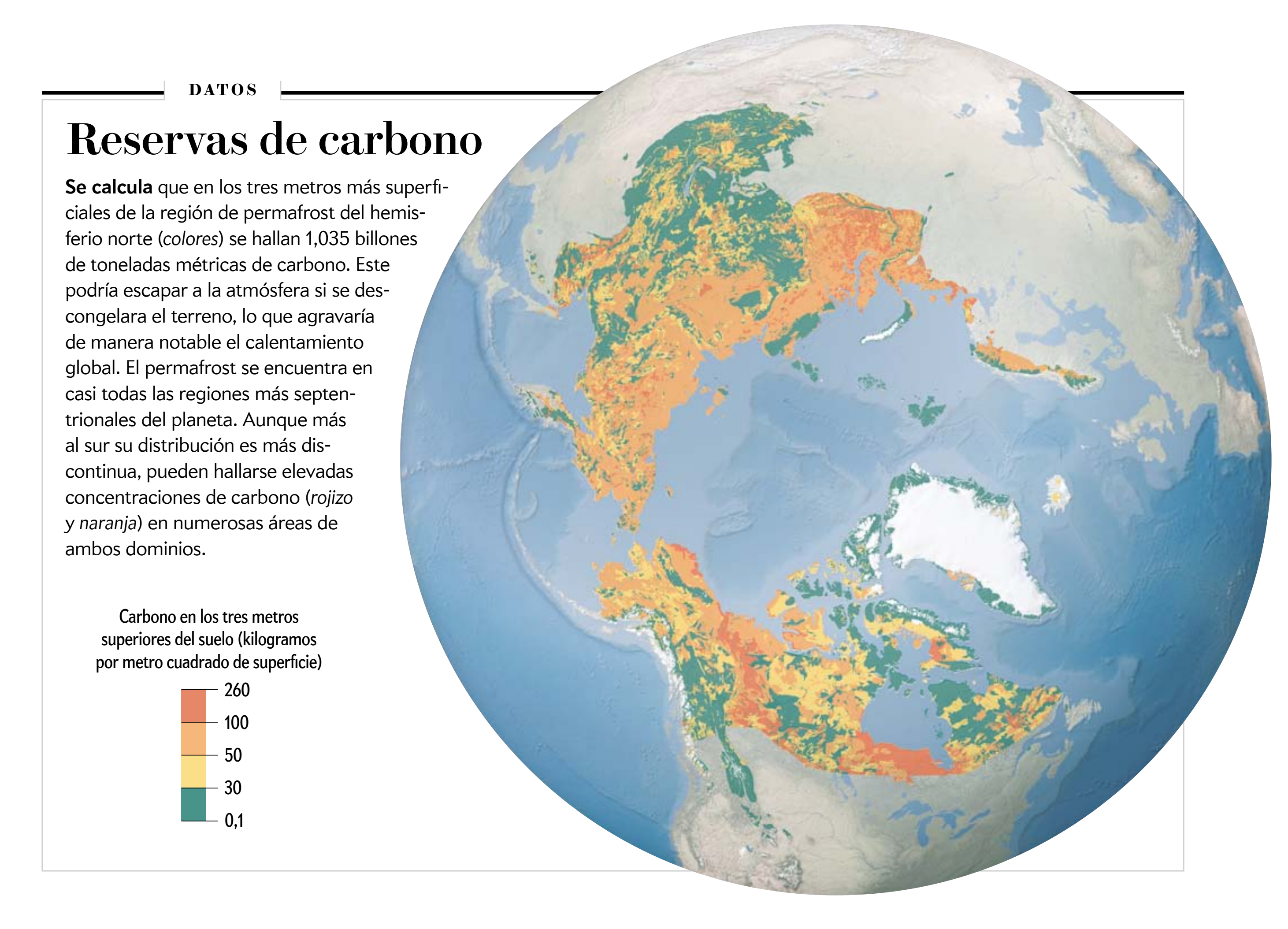
El carbono puede hallarse también enterrado a decenas de metros de profundidad. En total, se estima que la cantidad de carbono orgánico almacenado en el permafrost del hemisferio norte asciende a entre 1,33 y 1,58 billones de toneladas métricas, casi el doble de lo que ya alberga la atmósfera. A pesar de que la región de permafrost septentrional representa tan solo el 15 por cierto de la superficie del suelo en la Tierra, el carbono contenido en sus tres metros más superficiales equivale al 50 por cierto del que almacenan los tres metros superiores del resto de los suelos del planeta.

Los científicos también analizan actualmente el carbono orgánico en lugares donde no lo hemos hecho antes, como el permafrost sumergido en fondos marinos muy someros que bordean las costas árticas. La infiltración del agua marina degrada el suelo lentamente, y todavía desconocemos su verdadero contenido en carbono orgánico. El carbono también abunda en los gruesos depósitos sedimentarios de los vastos deltas fluviales del

DATOS

Reservas de carbono

Se calcula que en los tres metros más superficiales de la región de permafrost del hemisferio norte (*colores*) se hallan 1,035 billones de toneladas métricas de carbono. Este podría escapar a la atmósfera si se descongelara el terreno, lo que agravaría de manera notable el calentamiento global. El permafrost se encuentra en casi todas las regiones más septentrionales del planeta. Aunque más al sur su distribución es más discontinua, pueden hallarse elevadas concentraciones de carbono (*rojizo y naranja*) en numerosas áreas de ambos dominios.



FUENTE: «CLIMATE CHANGE AND THE PERMAFROST CARBON FEEDBACK», E. A. G. SCHUUR ET AL. EN *NATURE*, VOL. 520, 9 DE ABRIL DE 2015; MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)

Ártico, si bien aún nos quedan numerosos sitios por estudiar. Según nuestras mejores estimaciones, entre tan diversos lugares podrían preservarse, en conjunto, unos 400.000 millones de toneladas adicionales de carbono.

¿CUÁNTO Y CON QUÉ RAPIDEZ?

En vista del ingente volumen de carbono orgánico almacenado en el permafrost, parece verosímil que la descongelación del suelo acarree la liberación de inmensas cantidades de gases de efecto invernadero. Su cuantificación depende de tres factores clave.

En primer lugar, ¿cuánto carbono podría convertirse en gases de efecto invernadero? A los microorganismos les es fácil metabolizar y liberar parte del carbono, pero no todo, ya que la fracción que resulte inaccesible o incomestible para los microbios permanecerá en el suelo.

En segundo lugar, ¿con qué rapidez liberará la acción microbiana los gases? Si el proceso de descomposición es rápido, el carbono puede integrarse en la atmósfera al cabo de menos de un año tras la descongelación del suelo; sin embargo, la mayor parte del carbono probablemente se liberará de forma gradual a lo largo de las décadas, en parte porque ya se encuentra en un estado semidescompuesto que los microorganismos continúan degradando lentamente.

La tercera cuestión fundamental es: ¿qué tipo de gases con efecto invernadero liberarán los microbios? La proporción de dióxido de carbono y metano determinará su verdadera contribución al calentamiento del planeta. Los suelos anegados con baja concentración de oxígeno (conocidos como ambientes anaeróbicos), como las turberas, suelen producir mucho más metano que dióxido de carbono. Y, a igual masa, el potencial de calentamiento global del metano a lo largo de un siglo es unas 33 veces superior al del dióxido de carbono.

Mediante analizadores de infrarrojo que calculan las concentraciones de los gases contenidos en el aire a lo largo de segundos, días, estaciones y años, realizamos un seguimiento de la liberación de gases en los distintos lugares de estudio, como el lago Eight Mile y la tundra de sus inmediaciones. En Eight Mile, la tundra parece liberar a la atmósfera más carbono del que absorbe. Al calentar el suelo colocando vallas de contención de nieve, se intensifica y acelera el crecimiento de las plantas, que extraen y acumulan más dióxido de carbono del aire. No obstante, el mismo proceso también contribuye a que los microbios descompongan más carbono en el suelo. En verano, el mayor crecimiento de las plantas compensa esa liberación adicional de carbono. Sin embargo, la continua actividad microbiana durante la larga estación otoñal e invernal, cuando la actividad de las plantas es mucho menor, inclina el balance anual hacia una expulsión neta de carbono hacia la atmósfera.

La combinación de nuestros resultados con los procedentes de experimentos realizados en otras partes del planeta permite concluir que, en la actualidad, la descongelación del permafrost libera carbono hacia la atmósfera. Esos datos se agregan en la Red del Carbono del Permafrost. Como en la parábola de los ciegos que describen un elefante, los investigadores del Ártico cuentan con una valiosa información que, solo una vez puesta en contexto, servirá para comprender mejor la verdadera dimensión y naturaleza del fenómeno. La Red del Carbono del

Permafrost también sintetiza resultados científicos con el fin de elaborar informes, documentos para los organismos competentes y entrevistas con los medios de comunicación. Con ello, se persigue informar a políticos y ciudadanos para que puedan elegir cómo actuar ante los cambios que está sufriendo nuestro planeta.

Un reciente proyecto de síntesis ha contribuido a esclarecer la cuestión sobre las emisiones relativas de dióxido de carbono y metano. En condiciones aeróbicas (suelos secos), los microorganismos liberan principalmente dióxido de carbono. Pero, en las condiciones anaeróbicas de humedales y turberas, emiten tanto dióxido de carbono como metano. Christina Schädel, profesora ayudante de investigación de la Universidad de Arizona del Norte, miembro de mi equipo y figura fundamental de la Red del Carbono del Permafrost, ha analizado los efectos que este balance de gases ejerce sobre el clima.

A diferencia de nuestros estudios de campo, Schädel basó su investigación en experimentos de laboratorio, a donde llevaba muestras de suelo congelado para calentarlas en cámaras de cristal y, de esa manera, calcular con precisión qué cantidad de carbono se convertía en dióxido de carbono o metano, así como la velocidad de cada proceso. Empleando técnicas estadísticas para analizar conjuntamente los datos procedentes de ensayos similares realizados en todo el mundo, Schädel halló que el dióxido de carbono era, en peso, el gas de efecto invernadero predominante entre los liberados por muestras de suelo idénticas, con independencia de que estas hubiesen sido encontradas en condiciones aeróbicas o anaeróbicas. Sorprendentemente, el impacto climático de los gases de efecto invernadero liberados durante la descomposición aeróbica resulta dos veces superior al efecto de los gases los expulsados en condiciones anaeróbicas, a pesar del efecto adicional del metano, que solo se libera en las segundas.

Por tanto, podemos concluir que la descongelación de un permafrost situado en terrenos relativamente bien drenados y a altitudes elevadas tendrá, probablemente, una mayor repercusión en el clima que la descongelación de un volumen similar de un suelo anegado y a poca altura. Si bien el metano todavía representa un parámetro fundamental de la ecuación, la distribución general de la altura del terreno en la geografía ártica determinará de forma significativa la influencia de la descongelación del permafrost en el clima.

ACELERACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Al integrar los datos de campo con los resultados experimentales de laboratorio y combinarlos con las simulaciones por ordenador de futuros escenarios climáticos, la Red del Carbono del Permafrost ha obtenido una respuesta a la pregunta sobre la manera en que la descongelación del permafrost afectará al clima. En opinión de estos expertos, en este siglo probablemente se liberará a la atmósfera entre un 5 y un 15 por ciento del carbono contenido en el permafrost, la mayor parte del cual lo hará en forma de dióxido de carbono.

De acuerdo con nuestras estimaciones, el valor central (10 por ciento) de ese intervalo de emisiones supondría expulsar a la atmósfera entre 130.000 y 160.000 millones de toneladas adicionales de carbono. Una cantidad que, liberada principalmente en forma de dióxido de carbono y a velocidad constante a lo largo de un siglo, sería similar al carbono expulsado en todo el mundo como resultado de la deforestación y otros cambios en el uso del terreno, aunque notablemente inferior a las emisiones procedentes de los combustibles fósiles. La descongelación del permafrost hará que el cambio climático sea aún más rápido de lo que habían estimado los científicos considerando exclusivamente las emisiones derivadas de las actividades humanas. Y, probablemente, el permafrost continuará emitiendo carbono más allá de este siglo. Cada nueva tonelada de carbono liberada a la atmósfera por un Ártico en proceso de descongelación impondrá un coste adicional a la sociedad.

La idea de aplicar en el Ártico algún tipo de solución de carácter local para reducir la descongelación del permafrost no es realista. La única medida factible consiste en reducir el calentamiento a nivel global limitando las emisiones procedentes de los combustibles fósiles y la deforestación. De esa forma disminuirían a su vez las emisiones relacionadas con la descongelación del Ártico, y las sociedades de cualquier latitud dispondrían de más tiempo para adaptarse.

Los científicos no calcularon esa horquilla de entre el 5 y el 15 por ciento hasta el año pasado. Todavía no contamos con un sistema exhaustivo de observación de las regiones de permafrost que nos permita realizar una predicción más firme. Un mayor número de sensores facilitaría una detección más precisa de aquellos cambios, tanto lentos como rápidos, que podrían hacer aumentar o disminuir nuestras preocupaciones. Además, nos permitirían identificar posibles variaciones inesperadas.

Gracias a una serie de nuevas iniciativas, como el proyecto Experimentos de Siguiente Generación sobre Ecosistemas: Ártico, del Departamento de Energía de EE.UU., y el Experimento de Vulnerabilidad Ártica-Boreal, de la NASA, se están colmando importantes lagunas en la modelización de las mediciones in



UNA TORRE INSTRUMENTAL mide la transferencia de dióxido de carbono y metano entre el aire y el suelo durante todo el año, lo que indica si el ecosistema experimenta una ganancia o una pérdida neta de gases.

situ, como las de Eight Mile, así como en las posibilidades para aumentar su escala hasta la regional y, finalmente, la global.

Otra cuestión clave a la par que enigmática es la de si un crecimiento masivo de las plantas podría contrarrestar las emisiones de carbono procedentes del permafrost. Las recientes simulaciones tienden a indicar que unos períodos de crecimiento más prolongados, unas temperaturas más cálidas, una mayor liberación de nutrientes para las plantas como resultado de la descomposición del suelo, y una transición natural hacia especies de plantas y árboles de crecimiento rápido podrían compensar la emisión de carbono del permafrost durante el siglo actual. Sin embargo, esa estimación contradice los datos obtenidos en el lago Eight Mile y otros puntos, que demuestran una pérdida anual neta de carbono.

También sería de ayuda mejorar las simulaciones de la subsidencia de los terrenos en proceso de descongelación, ya que este fenómeno no está incluido en los actuales modelos a gran escala sobre la interacción entre el carbono del permafrost y el clima. A medida que el hielo del permafrost se funde y el agua se drena, se produce la subsidencia del terreno, lo que a su vez intensifica la descongelación. ¿Podría una subsidencia generalizada incrementar aún más las emisiones?

Nuestro equipo ha observado precisamente ese efecto en el lago Eight Mile cuando volvimos allí la pasada primavera. Los tablones para caminar que habíamos colocado hacía una década junto a los analizadores de flujos gaseosos y otros dispositivos se habían deformado y levantado por la subsidencia, y el terreno mostraba hoyos y ondulaciones.

La descongelación en el lago Eight Mile también ha alcanzado cotas históricas durante la primavera de 2016, más de un metro en algunos puntos, algo que en los años anteriores solo se registraba de ordinario a finales de verano. Los inusuales valores eran parejos a otros fenómenos extremos observados en otros lugares: la excepcionalmente temprana retirada de la cubierta de hielo invernal del océano Ártico, el derretimiento prematuro de la nieve en el hemisferio norte, y la fusión superficial temprana del casquete glaciar de Groenlandia. El permafrost ya emite carbono en la actualidad. Los gases no se liberarán de una forma súbita que pudiera alterar drásticamente el clima, como se había temido. Con todo, el fenómeno será general, se mantendrá durante varias décadas y agravará seriamente el desalentador reto que ya supone para la sociedad frenar el calentamiento global. IyC

PARA SABER MÁS

High risk of permafrost thaw. Edward A. G. Schuur y Benjamin Abbott en *Nature*, vol. 480, págs. 32-33, diciembre de 2011.

Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change. E. A. G. Schuur et al. en *Climatic Change*, vol. 119, n.º 2, págs. 359-374, julio de 2013.

Climate change and the permafrost carbon feedback. E. A. G. Schuur et al. en *Nature*, vol. 520, págs. 171-179, abril de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Metano: una amenaza emergente. Katey Walter Anthony en *IyC*, febrero de 2010.

Calentamiento global: ¿Más rápido de lo previsto? John Carey en *IyC*, enero de 2013.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.

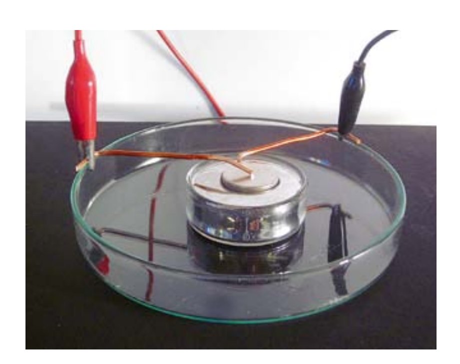


Motores mínimos (II)

Descubrimos en esta segunda entrega las mil y una variantes de los motores más simples, en este caso animados por una batería eléctrica

Cuenta la historia que Faraday, desesperado por establecer algún nexo entre magnetismo, electricidad y movimiento mecánico, ensayaba todas las combinaciones imaginables entre imanes, pilas electroquímicas y sistemas de movimiento de mínima fricción. Un día tomó un vaso con mercurio y dejó flotando en él un imán de barra. Como era de esperar, el imán descansó horizontal en el metal líquido. Faraday subsanó el problema fijando en un extremo, con un poco de lacre, un lastre de platino. El imán se hundió y quedó vertical: por encima de la superficie libre despuntaba solo uno de sus polos. Se agenció luego una potente pila eléctrica: sumergió uno de los terminales en el mercurio y con el otro tocó el extremo del imán que sobresalía del líquido. Al cerrar el circuito eléctrico, la barra magnética empezó a girar. Había inventado el motor eléctrico o, mejor dicho, un tipo de motor eléctrico.

Si hoy quisiéramos repetir ese experimento nos resultaría infinitamente más barato, ya que, gracias a los potentísimos imanes actuales, podríamos prescindir del platino y usar un simple disco de neodimio. Busquemos, pues, algunos centímetros cúbicos de mercurio, un recipiente de dimensiones adecuadas para que el mercurio forme en su base una capa continua, y también un imán discoidal de neodimio. Por fin, nos quedará solo repetir los gestos de Faraday y conectar una fuente de alimentación de corriente continua. Recordemos: un polo directamente al mercurio y el otro justo en el centro del imán. Unos pocos voltios serán suficientes; eso sí, necesitaremos algunos amperios, ya que la resistencia del circuito es mínima. Con semejante corriente, el imán girará a toda velocidad, dejando pasmado al investigador.



MOTOR DE FARADAY: Un simple imán discoidal de neodimio hace de rotor. Conectado a una fuente de alimentación, empezará a girar con mínima fricción.

Para experimentar con mercurio debemos tomar ciertas precauciones, so pena de sufrir los mismos efectos nefastos que padeció Faraday. Por tanto, trabajaremos en un ambiente perfectamente ventilado. Lo haremos sobre una bandeja de plástico donde pueda recogerse cualquier posible derrame y utilizaremos para guardar el azogue botes de cierre hermético garantizado.

Con todo, puede que tantas cautelas generen cierta aprensión. Ningún problema. Por suerte, la potencia de los imanes modernos nos permite prescindir también del tóxico mercurio. El motor homopolar es precisamente eso: un motor de Faraday pero con otro sistema de giro.

El montaje es simple: una pila de 1,5 voltios en la que se mantiene suspendido un rotor formado por un tornillo de acero y un pequeño imán de neodimio. El circuito compuesto por estos componentes se cierra con un retal de hilo de cobre que, además, hace la función de escobilla. Ese fue el motor que me mostró el profesor Julio Güémez, de la Universidad de Cantabria, y que me cautivó por su simplicidad.

Observemos que, por añadidura, el motor homopolar incorpora su propio manantial eléctrico y que, como en el caso anterior, la resistencia eléctrica del circuito es mínima. Conclusión: la pila se agota rápidamente y después de algunos minutos de funcionamiento se calienta de forma perceptible. Además, el contacto eléctrico entre el hilo y el imán debe soportar un alto amperaje, de forma que tiene tendencia a chispear y oxidar la zona de contacto. Todos estos defectos se suman y, para exasperación del experimentador, el motor a menudo falla. Harto de estas circunstancias, decidí pergeñar una versión mejorada.



MOTOR HOMOPOLAR: Este es el modelo más clásico, espartano en materiales y de simple construcción. El contacto entre el hilo de cobre y el imán, la escobilla, constituye su punto débil.

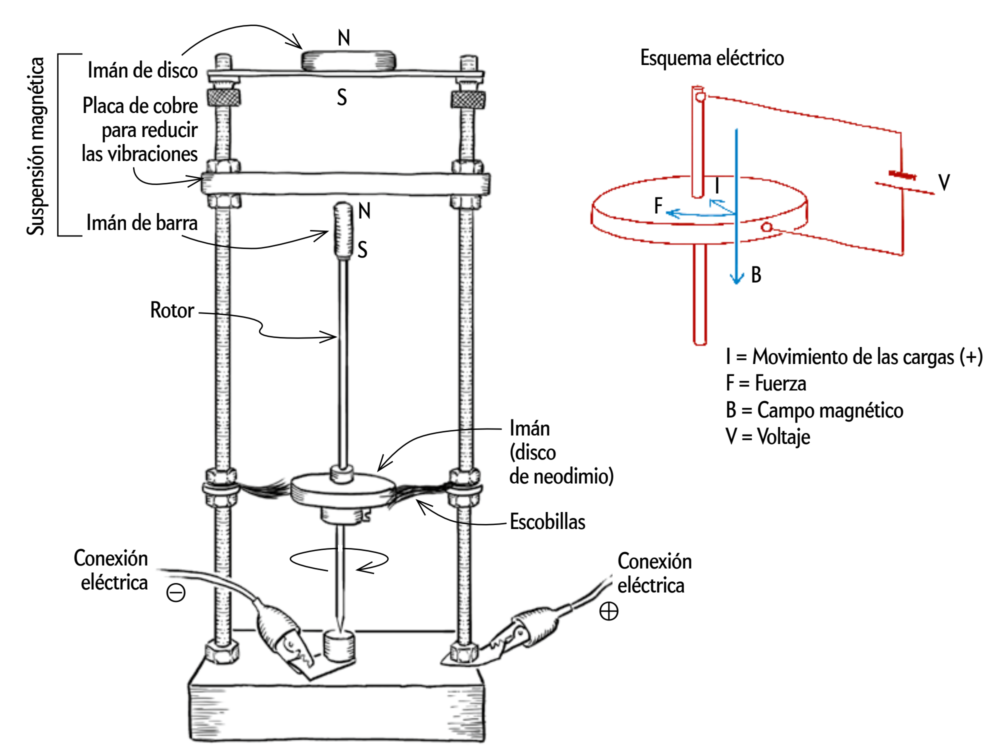
Como ya vimos en la entrega anterior, lo primero que debemos hacer es reducir la fricción al mínimo. De nuevo, el contacto «en punta» resulta idóneo. Por otro lado, es imprescindible reducir los grados de libertad del rotor, de forma que el único movimiento posible sea el de rotación. Esto lo podemos lograr mediante una suspensión magnética (un montaje útil para otros numerosos dispositivos).

La idea es construir un eje vertical con un material conductor. En su extremo superior acoplamos un pequeño imán de barra. El conjunto permanecerá vertical

TODAS LAS IMÁGENES: MARC BOADA FERRER



MOTOR HOMOPOLAR CON SUSPENSIÓN MAGNÉTICA: Sin duda es el más rápido. Tanto, que se impone algún tipo de control de las vibraciones. Obsérvese la placa de cobre entre los imanes que se encargan de la suspensión magnética.



gracias a un imán fijo que, mediante su atracción, estabilizará la posición del eje. Sobre este rotor de reducidísima fricción montaremos lo que deseemos probar: en este caso, otro imán. Yo utilicé un disco de neodimio de 30 milímetros de diámetro y 4 de espesor al que había practicado un agujero con el torno justo en el centro. Para garantizar un buen contacto eléctrico, dos casquillos presionan el imán y lo fijan al eje. Ya solo queda conectar el manantial eléctrico. Un contacto corresponde al eje de giro, que, apoyado sobre una base también metálica, transmitirá la corriente hasta el centro del imán. Precisamente en el perímetro de este contactarán dos escobillas que cerrarán el circuito.

Utilizando una fuente de alimentación bien potente, el imán llega a girar a varios miles de revoluciones por minuto. Espectacular. Más de lo que mi tacómetro láser es capaz de medir. Prepárese el investigador: a semejante velocidad los errores se pagan en forma de vibraciones que pueden amplificarse hasta causar la destrucción del instrumento. En efecto, el más mínimo desequilibrio se amplifica con la velocidad, a veces hasta que el rotor sale disparado a algunos metros de distancia. Se impone, pues, cierto sistema de estabilización.

Miremos de nuevo la fotografía. Observemos que, entre el imán fijo de arriba y el que se halla en el extremo del eje, se encuentra una espesa placa de cobre. Su función es devolver el rotor a una posición centrada cuando las vibraciones lo alejan de esta. Como el lector avispado puede imaginar, este desplazamiento se debe a las corrientes de Foucault que aparecen en el cobre tan pronto como el rotor deja de girar centrado.

Si bien este diseño disfruta de un funcionamiento casi perfecto, adolece de cierta dificultad de construcción. No debe deprimirse el experimentador. Un rápido vistazo a YouTube le remitirá a montajes mucho más simples, entre los que no encontrará el que describimos a continuación.

La peonza eléctrica elimina la complejidad anterior, ya que consiste solo en lo esencial: un disco de neodimio al que hemos montado un eje que lo atraviesa.



PEONZA ELÉCTRICA: Una variante más del motor homopolar. En este caso, el imán actúa también como un volante de inercia que estabiliza el giro.

Colocamos esta peonza sobre una superficie metálica perfectamente pulida. La ponemos en marcha con los dedos y, una vez esté girando, la tocamos con el polo de una batería mientras que con el otro polo tocamos la base metálica sobre la que gira. Cerrado así el circuito, el imán se convierte en rotor y también en volante de inercia, y el giro de la peonza se mantiene tanto tiempo como dure la paciencia del experimentador, que debe estar «tocando», delicadamente, imán y placa con los cables. Tanto tiempo puede funcionar que el chisporroteo de los contactos sobre el perímetro del imán acaban por oxidar el recubrimiento electrolítico de este y, al llegar al compuesto de neodimio, el proceso se acelera aún más.

Hasta aquí hemos visto imanes en rotación, sin ahondar en la física que se esconde tras este precioso fenómeno. En realidad, lo que hemos descubierto son manifestaciones de la fuerza de Lorentz, es decir, la deflexión de las trayectorias de los portadores de carga bajo un campo magnético.

Observemos el dibujo de esta página. El imán forma parte del circuito eléctrico y, por tanto, los electrones deben atravesarlo para cerrar el circuito. Al hacerlo, siguen la trayectoria más corta posible: la línea recta que une el centro del imán con el punto de contacto de la escobilla. Parece fácil, pero al circular los electrones por el interior del imán, su propio campo mag-



MOTOR HOMOPOLAR CON CONDUCTOR ROTATORIO: Si el lector bucea en Internet, descubrirá versiones menos estoicas y más creativas de este motor. El principal reto de su construcción consiste en equilibrar el rotor y garantizar un buen contacto eléctrico.

nético interacciona con el del imán, lo que obliga a las cargas a alterar su trayectoria. A su vez, el campo del imán también interactúa y tiende a «alejarse» del que generan los electrones; experimenta, por tanto, un momento de rotación. Resultado: el imán gira.

Puede razonarse que, si el imán experimenta un movimiento reactivo gracias a la interacción de los campos magnéticos, también lo deberá experimentar el conductor que lo alimenta. En efecto, hay otro motor mínimo en el que, en vez de girar el imán, lo que gira es el conductor. Nos referimos al motor homopolar con conductor rotatorio.

Para construirlo necesitaremos solo unos imanes con un diámetro algo superior a la pila de 1,5 voltios y un trozo de cable de cobre rígido. Sobre la pila instalaremos este curioso rotor de hilo de cobre rígido. Deberemos ajustar las dimensiones para que el contacto se cierre con la mínima presión. Además, con la punta de un bolígrafo haremos una incisión cóncava en el polo superior de la pila, para que el cable quede más centrado y estable. (Hay incluso quien sobre el rotor pone un ligero disco de papel, decorado con sectores de distintos colores que, al girar, producen el efecto del disco de Newton.) Obviamente, girando los imanes conseguiremos que el conductor gire en uno u otro sentido y con más o menos suavidad.

Solo para citar una más de las infinitas variantes de los motores homopolares, describimos ahora la más simple que, hoy por hoy, conocemos: el coche eléctrico. Consta solo de una pila, dos imanes y una superficie conductora, papel de aluminio en este caso. Montemos los imanes en los extremos de la pila, juguemos con la orientación de sus campos magnéticos respectivos y la polaridad de la pila, y bien pronto el «coche» estará rodando sobre la mesa —atención: no lo hará a menos que los dos imanes tengan polos idénticos enfrentados—. A diferencia de otros modelos, este no requiere manipulación ni un pulso de cirujano. ¿Alguien da más?

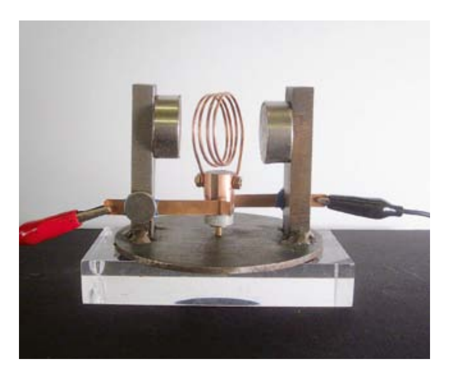
Para terminar nuestra exploración de lo simple, cambiaremos de estrategia. Los motores homopolares pueden ser simples, pero poco se parecen a los que utilizamos en nuestro día a día, puesto que lo normal en el ámbito técnico es utilizar como rotor un electroimán convenientemente gobernado.

En este sentido, hace poco descubrí un modelo especialmente interesante en un catálogo de material escolar: el motor de Lorentz. Este consiste en un solenoide por el que circula una corriente eléctrica bajo un campo magnético exterior. Como este último permanece constante, hemos de cambiar la polaridad eléctrica con la que alimentamos las espiras, de forma que el campo magnético que producen sea siempre contrario al de los imanes permanentes. De ello se encarga un colector, la parte delicada del asunto.

Observemos la última fotografía. El arrollamiento de cobre va montado sobre un cilindro de plástico en el que hay pegadas dos plaquitas de cobre. Las espiras se conectan a estas mediante soldadura. Sobre las plaquitas de cobre presionan dos escobillas hechas con chapa de latón duro de pocas décimas de espesor. Estas se conectan a una fuente de alimentación y el solenoide empieza a girar.



COCHE ELÉCTRICO: Una pila con dos imanes en sus extremos constituye a la vez la unidad propulsora y el sistema de rodadura.



MOTOR DE LORENTZ: El más difícil de construir, sobre todo su sistema de escobillas. Este es solo un prototipo de prueba, destinado a comprobar su viabilidad.

Atendamos a los detalles. Los dos imanes de neodimio son de 30 milímetros de espesor y se hallan fijados por su propia fuerza magnética sobre una pieza de hierro en forma de herradura. Eso aumenta en mucho su potencia. (En esta ocasión, los duendes del laboratorio fueron generosos y, contrariamente a lo que suele ocurrir, el aparatillo de marras funcionó a la primera. Por ello no pararemos de insistir en lo importante de la paciencia para construir estos delicados artefactos, literalmente millones de veces menos potentes que el motor de la lavadora.)

Dedicaremos la próxima entrega de esta serie sobre motores mínimos a los artefactos que transforman el calor en movimiento mecánico. Mientras tanto, recuerden los lectores que pueden ver vídeos sobre todos los motores que hemos descrito hasta ahora en *Taller y laboratorio 2.0*, el blog del autor en Scilogs. Estaremos encantados de recibir (en el propio blog o mediante un correo electrónico a redaccion@investigacionyciencia.es) sus comentarios y propuestas sobre más motores mínimos.

PARA SABER MÁS

El blog del autor, *Taller y laboratorio 2.0*, alberga varios vídeos que muestran los distintos motores en funcionamiento. **www.investigacionyciencia.es/blogs/tecnologia/14**

EN NUESTRO ARCHIVO

Motores mínimos (I). Marc Boada en *IyC*, diciembre de 2016.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



¿Están conectados los números naturales y los infinitos?

Una sorprendente consecuencia aritmética de la existencia de ordinales infinitos

En ocasiones parece que los números infinitos viven aislados de lo que ocurre en las matemáticas «concretas», como si nada de lo que sucede en el mundo de los números naturales dependiera de la existencia de números infinitos. Sin embargo, las apariencias engañan. Hay problemas sencillos sobre las propiedades de los números naturales —problemas que pueden explicarse sin mayores dificultades a un estudiante de secundaria— cuya solución depende de lo que ocurra en el mundo de los números infinitos.

En esta columna vamos a examinar uno de ellos. La solución, como veremos, resulta bastante contraintuitiva. Con todo, lo más sorprendente de nuestro problema es que no puede resolverse a partir de los axiomas de Peano, los axiomas considerados canónicos para definir los números naturales y sus propiedades. Para solucionarlo habremos de pedirle ayuda a números infinitos bastante grandes; grandes, al menos, desde la perspectiva de los números naturales.

¿Secuencias finitas o infinitas?

Consideremos un número natural cualquiera; por ejemplo, el 266. A continuación definiremos una secuencia de números naturales, a la que llamaremos σ_{266}, de la siguiente manera. El primer elemento, $\sigma_{266}(1)$, será el 266. Para obtener el segundo, comenzaremos por escribir 266 como una suma de potencias de 2; después, expresaremos cada uno de los exponentes como suma de potencias de 2, para luego reescribir cada nuevo exponente como suma de potencias de 2, etcétera. En este caso, obtenemos:

$$266 = 2^8 + 2^3 + 2 = 2^{2^3} + 2^{2+1} + 2 = 2^{2^{2+1}} + 2^{2+1} + 2$$

(donde, recordemos, $1 = 2^0$ y $2 = 2^1$). Llamaremos a esta suma «representación canónica en base 2» de 266.

Ahora reemplazaremos cada 2 de la expresión de arriba por un 3:

$$3^{3^{3+1}} + 3^{3+1} + 3$$

(notemos que el 1 no se ve afectado por este cambio, ya que $1 = 2^0 = 3^0$). Por último, restaremos 1 a la suma anterior. El resultado será el segundo elemento de nuestra secuencia:

$$\sigma_{266}(2) = 3^{3^{3+1}} + 3^{3+1} + 1 + 1 = 3^{81} + 3^4 + 2 ,$$

o, dicho de otro modo:

$$\sigma_{266}(2) = 443.426.488.243.037.769.948.249.630.619.149.892.886 .$$

Usando ahora la representación canónica en base 4, en base 5, etcétera, el proceso puede iterarse de manera análoga para calcular los restantes elementos de la sucesión. Por ejemplo, $\sigma_{266}(3)$ y $\sigma_{266}(4)$ vienen dados por:

$$\sigma_{266}(3) = 4^{4^{4+1}} + 4^{4+1} + 1 = 4^{1024} + 4^5 + 1 \sim 10^{616},$$
$$\sigma_{266}(4) = 5^{5^{5+1}} + 5^{5+1} = 5^{15.625} + 5^6 \sim 10^{10.000}.$$

Por supuesto, podemos emplear el mismo procedimiento para calcular las secuencias asociadas a cualquier otro número natural n distinto de 266. En lo sucesivo, denotaremos mediante σ_n la secuencia correspondiente al número natural n.

Diremos que una secuencia «termina» si consta de un número finito de enteros positivos seguidos de una secuencia infinita de ceros. Resulta sencillo comprobar que, para n bastante pequeños, σ_n termina. Por ejemplo:

$$\sigma_2 = \{2, 2, 1, 0, 0, 0, ...\} ,$$
$$\sigma_3 = \{3, 3, 3, 2, 1, 0, ...\}.$$

El asunto comienza a ponerse interesante a partir del 4. El primer elemento de σ_4 es, por supuesto, el 4. Su representación canónica en base 2 viene dada por 2^2, de modo que $\sigma_4(2) = 3^3 - 1 = 26$. Continuando de esta manera podemos obtener los primeros 10 elementos de σ_4:

$$\sigma_4 = \{4, 26, 41, 60, 83, 109, 139, 173, 211, 253, ...\}.$$

Por fuerza bruta, podríamos comprobar que σ_4 termina después de unos... ¡$6{,}89 \cdot 10^{121.210.694}$ elementos!

Nuestro problema, finalmente, es el siguiente: ¿existe algún número natural n tal que σ_n contenga un número infinito de enteros positivos? O, dicho de otro modo: ¿existe algún n para el que σ_n nunca termine?

Por sorprendente que pueda parecer, la respuesta es negativa. Aunque a la vista de los ejemplos anteriores podríamos pensar que, para n lo suficientemente grande, σ_n crecerá de manera indefinida (y a una velocidad extraordinaria), resulta posible demostrar que, antes o después, todas las secuencias del tipo σ_n siempre terminan. Para ver por qué, antes tendremos que tomar un pequeño desvío.

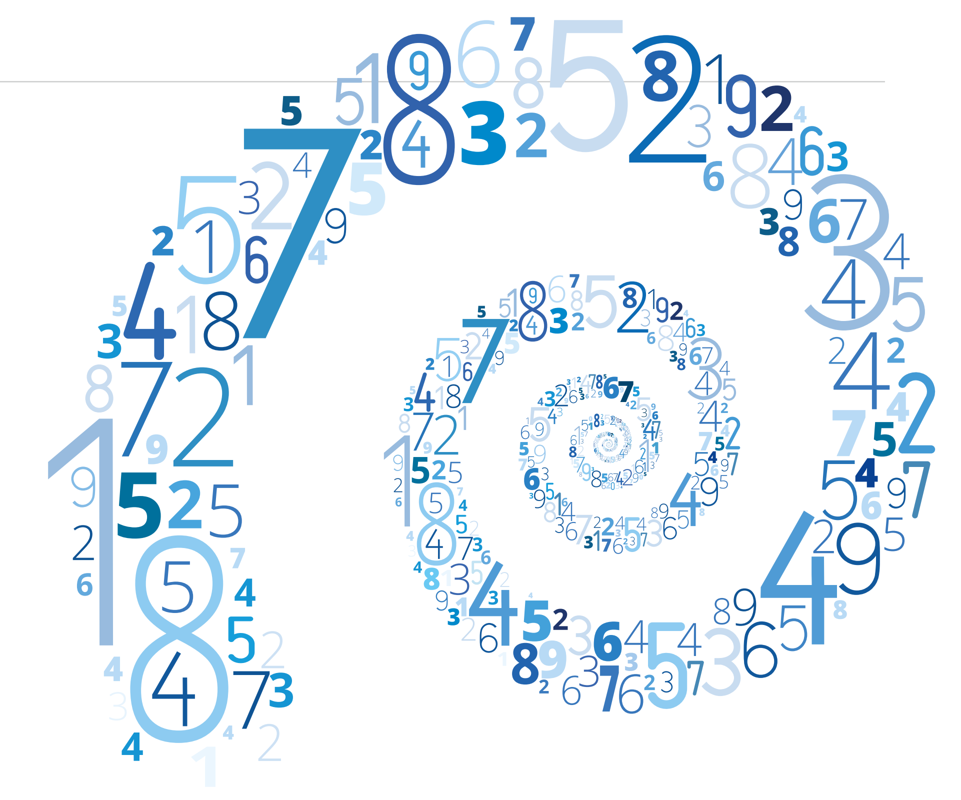
Contar más allá del infinito

Conocemos desde pequeños los números naturales: 0, 1, 2, ... Pero lo que nuestros padres o maestros nunca nos dijeron es que, después del 5, del 453, del $10^{10.000.000.000}$, después de todos los números naturales, existe otro, llamado ω. A este número se le conoce también como «primer ordinal infinito».

Al igual que ocurre con los números naturales, tras ω hay otro número, ω + 1. Y lo mismo sucede con ω + 1: tenemos también (ω + 1) + 1 = ω + 2. Y, bueno, no hay por qué detenerse ahí:

$$0, 1, 2, 3, ...\ \omega, \omega + 1, \omega + 2, \omega + 3 ...$$

Pero este tampoco es el fin de la historia. Así como existe un número mayor que todos los números naturales, hay uno mayor que todos los números de la forma



$\omega + n$, donde $n < \omega$. Como imaginará, denotaremos ese número $\omega + \omega$.

No quiero aburrirle. Ya puede imaginar cómo continúa la lista:

$$0, 1, 2, 3, \ldots\ \omega, \omega+1, \omega+2, \omega+3, \ldots\ \omega+\omega,$$
$$\omega+\omega+1, \ldots\ \omega+\omega+\omega, \omega+\omega+\omega+1 \ldots$$

Pero esto no es todo. Llamemos $\omega{\cdot}2$ a $\omega + \omega$, $\omega{\cdot}3$ a $\omega + \omega + \omega$, etcétera. De esta manera, además de números de la forma $\omega + n$, tendremos también los del tipo $\omega \cdot m + n$.

¿Podemos continuar? ¡Claro! Después de todos los números de la forma $\omega{\cdot}m$ viene un número aún mayor: $\omega \cdot \omega$, o ω^2. Y tras ω^2 encontramos —¡sorpresa!— los números $\omega^2 + 1$, $\omega^2 + 25$, $\omega^2 + \omega$...

Tal y como obtuvimos ω^2, podemos también definir ω^3 (mayor que todos los números de la forma $\omega^2 \cdot m$), ω^4, ω^5... Y después de todos los números de la forma ω^n podemos encontrar ω^ω y todas sus sucesivas potencias con exponente ω.

No se sorprenderá si le digo que los ordinales infinitos tampoco acaban ahí. Antes o después llegaremos a un número, llamado ε_0, tal que:

$$\omega^{\varepsilon_0} = \varepsilon_0,$$

el cual puede representarse como:

$$\varepsilon_0 = \omega^{\omega^{\omega^{\omega^{\cdot^{\cdot^{\cdot}}}}}}$$

Por último, no es difícil convencerse de que cada número menor que ε_0 puede escribirse de la siguiente forma:

$$\omega^{\beta_1} \cdot c_1 + \omega^{\beta_2} \cdot c_2 + \ldots + \omega^{\beta_n} \cdot c_n,$$

donde las c_i representan números naturales y donde $\beta_1 > \beta_2 > \ldots\ \beta_n \geq 0$ (cada uno de ellos menor que ε_0).

Ahora, es posible demostrar que no existe ninguna secuencia infinita descendiente de números ordinales. Ello se debe a que los ordinales son, en un sentido preciso, una generalización de los números naturales. Y, del mismo modo que no existe ninguna secuencia infinita descendiente de números naturales, lo mismo ocurre con los ordinales.

Así pues, si tenemos una secuencia infinita de ordinales β_1, β_2, β_3... tales que $\beta_i > \beta_{i+1}$ para todo i, sabremos que dicha secuencia tendrá que hacerse cero antes o después; es decir, habrá de existir un k tal que $\beta_k = 0$.

Con estas herramientas ya podemos regresar a nuestro problema.

La solución

Recordemos los primeros elementos de la secuencia σ_{266}, en los que cada $\sigma_{266}(i)$ quedaba expresado por su representación canónica en base $(i + 1)$:

$$2^{2^{2+1}} + 2^{2+1} + 2\,,$$
$$3^{3^{3+1}} + 3^{3+1} + 1 + 1\,,$$
$$4^{4^{4+1}} + 4^{4+1} + 1\,,$$
$$5^{5^{5+1}} + 5^{5+1}.$$

Ahora consideremos lo que sucede si, en el primer elemento de la secuencia, reemplazamos cada 2 por ω; en el segundo, cada 3 por ω, y así sucesivamente. El resultado viene dado por la siguiente secuencia de ordinales, a la que llamaremos $[\sigma_{266}]_\omega$:

$$\omega^{\omega^{\omega+1}} + \omega^{\omega+1} + \omega\,,$$
$$\omega^{\omega^{\omega+1}} + \omega^{\omega+1} + 1 + 1\,,$$
$$\omega^{\omega^{\omega+1}} + \omega^{\omega+1} + 1\,,$$
$$\omega^{\omega^{\omega+1}} + \omega^{\omega+1}.$$

Ahora resulta inmediato verificar que $[\sigma_{266}]_\omega(1) > [\sigma_{266}]_\omega(2) > [\sigma_{266}]_\omega(3) > \ldots$ De hecho, lo mismo sucede con todos los elementos de la secuencia. Así pues, a partir de la observación con la que concluíamos el apartado anterior, sabemos que ha de existir algún número natural k tal que $[\sigma_{266}]_\omega(k) = 0$. Pero, por construcción, sabemos también que, para todo número i, $[\sigma_{266}]_\omega(i) \geq \sigma_{266}(i)$. Por tanto, ¡$\sigma_{266}$ deberá terminar antes o después!

Con un poco de cuidado, el mismo razonamiento puede generalizarse a cualquier número n. Es decir, si convertimos nuestras secuencias de números naturales σ_n en secuencias de ordinales, $[\sigma_n]_\omega$, es posible demostrar que σ_n siempre debe terminar, con independencia de cuál sea el número n. Problema resuelto.

No deja de ser sorprendente que secuencias como σ_{266}, que comienzan creciendo a una velocidad fabulosa, acaben descendiendo hasta llegar a 0. Sin embargo, esa no es la propiedad más fascinante de nuestras secuencias. En 1982, los matemáticos de la Universidad de Manchester Laurence Kirby y Jeff Paris demostraron que este resultado no puede deducirse a partir de los axiomas de Peano; es decir, los axiomas que determinan las propiedades básicas de los números naturales y que nos permiten formalizar la aritmética. Así pues, en un sentido preciso, para resolver este problema —un problema relativo a las propiedades de los números naturales— resulta imprescindible tomar el desvío por los números infinitos. IyC

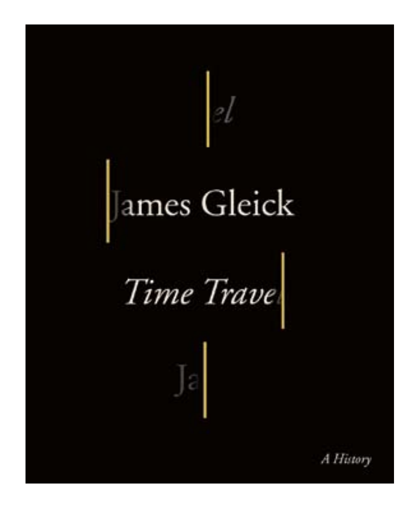
PARA SABER MÁS

El resultado sobre la terminación de las series que hemos considerado aquí fue obtenido en los años cuarenta por el matemático inglés Reuben L. Goodstein: **On the restricted ordinal theorem**, *The Journal of Symbolic Logic*, vol. 9, n.º 2, págs. 33-41, junio de 1944.

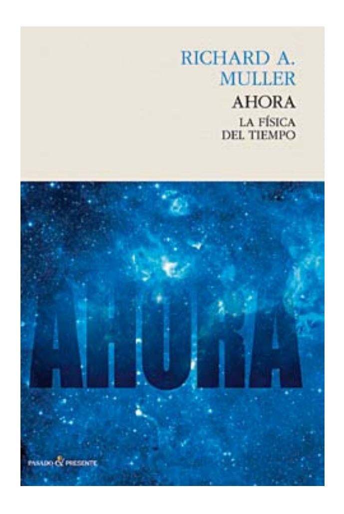
La demostración de que dicho resultado es independiente de los axiomas de Peano se debe a Laurence Kirby y Jeff Paris: **Accessible independence results for Peano arithmetic**, *Bulletin of the London Mathematical Society*, vol. 14, n.º 4, págs. 285-293, julio de 1982.

EN NUESTRO ARCHIVO

Infinitos cada vez mayores: los ordinales. Jean-Yves Girard en «Ideas del infinito», colección *Temas* de *IyC* n.º 23, 2001.



TIME TRAVEL
A HISTORY
James Gleick
Pantheon, 2016



AHORA
LA FÍSICA DEL TIEMPO
Richard A. Muller
Pasado & Presente, 2016

Encontrar el tiempo

Dos libros sobre el espinoso concepto de lo temporal

¿Qué es el tiempo? Para quienes nos dedicamos a la física, el tiempo es una cantidad en nuestras ecuaciones, *t*. Se trata de la variable que usamos para representar una de las cuatro dimensiones de la variedad del espaciotiempo, término acuñado por el matemático Hermann Minkowski después de que las teorías de la relatividad de Albert Einstein comenzaran a mostrar que el tiempo y el espacio eran intercambiables. Y, sin embargo, podemos movernos libremente hacia delante y hacia atrás en el espacio, pero no en el tiempo. ¿Por qué?

En *Time travel*, el escritor científico James Gleick examina esta y otras cuestiones centrándose, principalmente, en la ciencia ficción de los viajes en el tiempo. Comienza con *La máquina del tiempo*, de H. G. Wells, libro al que vuelve a menudo y que precede en más de una década a la teoría especial de la relatividad de Einstein, formulada en 1905. La obra nos ofrece un agradable recorrido por la cuarta dimensión y la elegante maquinaria victoriana de Wells; los autores de la «edad de oro» de la ciencia ficción, como Isaac Asimov, quienes sentaron las bases para los tratamientos modernos de los viajes en el tiempo; y la serie *Doctor Who*. Gleick explora también las propuestas más intelectuales de escritores como David Foster Wallace y Jorge Luis Borges, que imaginaba el tiempo como un «jardín de senderos que se bifurcan», o el cineasta Chris Marker, cuyo corto de ciencia ficción *La jetée* (1962) inspiró la película de cine negro sobre viajes en el tiempo *Doce monos* (1995).

No puede decirse que Gleick tenga reparos en hacer alarde de sus conocimientos; de hecho, introduce abundante información, sobre todo en las discusiones sobre física. La teoría general de la relatividad de Einstein, formulada en 1915, parece permitir la existencia de «curvas temporales cerradas»: caminos que empiezan en un lugar y momento dados y acaban exactamente en el mismo lugar y el mismo momento [*véase* «Una breve historia de los viajes en el tiempo», por Tim Folger; Investigación y Ciencia, noviembre de 2015]. Por desgracia, puede que crear un espaciotiempo con curvas de este tipo (es decir, una máquina del tiempo) sea imposible. Esta idea queda plasmada en la «conjetura de la protección de la cronología» de Stephen Hawking, según la cual el universo conspiraría para evitar la construcción de cualquier máquina del tiempo, pues ello requeriría disponer de estados de la materia imposibles físicamente, o podría generar un agujero negro alrededor de la máquina, lo que impediría acceder a ella.

Pero incluso el paso del tiempo tal y como lo percibimos normalmente, en un solo sentido, resulta misterioso. La mayoría de las ecuaciones microscópicas de la física poseen una simetría fundamental: no pueden distinguir si el tiempo avanza o retrocede (matemáticamente, permanecen idénticas si sustituimos t por $-t$). Sin embargo, no es así como experimentamos el tiempo. Nos movemos inexorablemente del pasado al futuro; recordamos el pasado y no tenemos conocimiento directo del futuro [*véase* «La flecha del tiempo», por Paul Davies; Investigación y Ciencia, noviembre de 2002]. Una excepción a la simetría por inversión temporal es la termodinámica, cuya segunda ley establece que la entropía siempre aumenta con el tiempo. El astrónomo Arthur Eddington opinaba que este hecho es, por sí solo, responsable de la «flecha del tiempo». El problema radica en que la segunda ley no habla realmente de física, sino de probabilidad y, por tanto, de conocimiento. Cuanto más elevada sea la entropía de un sistema, menos sabremos sobre sus detalles y más difícil resultará obtener trabajo útil.

La simetría temporal se rompe también en mecánica cuántica. Esta describe los sistemas físicos por medio de su función de onda y solo nos da probabilidades, no resultados seguros. Cuando efectuamos una medición cuántica, en ocasiones decimos que la función de onda «colapsa», un proceso que solo tiene lugar en un sentido. Pero también esto tiene que ver con el conocimiento según algunas formas modernas de entender la mecánica cuántica, como la interpretación de los muchos mundos, o la idea de que todos los resultados posibles se dan en alguna parte de un «multiverso». Cuando realizamos una medición, obtenemos información sobre el sistema.

Gleick dedica algunas páginas al «problema del ahora»: la cuestión de cómo las ecuaciones de la física parecen ofrecernos un universo en el que el tiempo no es simplemente una de las cuatro dimensiones del espaciotiempo. Muy al contrario, el tiempo es especial: ¿por qué vivimos siempre en un momento concreto, capaces de recordar solo el pasado y esperando a que llegue el futuro? Este problema incordia a numerosos físicos, entre los que me encuentro. En ocasiones, me veo convencido de que la cuestión sobre «el ahora» es un no-problema: toda vez que la mecánica cuántica y la termodinámica han conferido una dirección al tiempo, «ahora» ya no guarda relación con la física, sino con una combinación de la flecha del tiempo, la psicología y la fisiología. El pasado es lo que está codificado en nuestros recuerdos. Para una roca, un electrón o una galaxia, no hay un ahora. Con todo, en ocasiones me pregunto si esto es suficiente.

El físico Richard Muller también parece preocupado por este enigma, y su libro *Ahora* intenta proponer una solución. La obra comienza con una introducción divulgativa de la física necesaria: las teorías de la relatividad y la mecánica cuántica y los papeles que desempeñan la cosmología y la física de partículas en nuestro universo, como el bosón de Higgs y su campo capaz de conferir masa. Su introducción a la física moderna probablemente resulte demasiado técnica para la mayoría de los lectores legos, a pesar de que relega la mayor parte de las matemáticas más complejas a un conjunto de apéndices.

Por desgracia, tras dejar de lado la física, Muller se adentra en la filosofía, y lo hace con una discusión cuyo nivel apenas supera el de las cafeterías de la universidad. Por ejemplo, da por supuesto que el libre albedrío es incompatible con el determinismo: una idea que ha sido desmontada desde el punto de vista filosófico por, entre otros, Daniel Dennett, en su libro *La conciencia explicada* (Paidós Ibérica, 1995) o, el año pasado, por el físico Sean Carroll en su obra *The big picture* (Dutton). Sin embargo, Muller opta por la idea, manifiestamente no científica, de un alma no física con poderes causales sobre la función de onda cuántica.

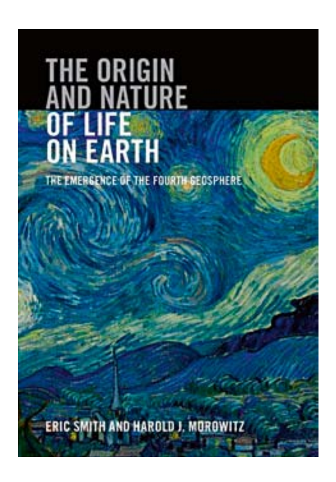
Lo anterior resulta extravagante, pero no deja de ser una nota al margen. La tesis principal de Muller es que la expansión del universo «está creando continuamente no solo nuevo espacio, sino también nuevo tiempo». Puede que como titular resulte muy llamativo, pero los cosmólogos dudan de si su punto de partida (la idea de crear nuevo espacio) tiene sentido. Tras escribir el libro, Muller ha desarrollado sus ideas de una manera más matemática y las ha aplicado a las observaciones de ondas gravitacionales efectuadas el año pasado. Es loable que haya propuesto una idea que tal vez pueda ponerse a prueba. Muy pocos libros de física divulgativos o profesionales se molestan en hacer argumentaciones, sino que suelen limitarse a resumir el estado de la cuestión. Sin embargo, no comulgo con los argumentos de Muller: con independencia de si el «ahora» representa o no un problema, sus ideas no aportan una solución, al menos desde mi punto de vista.

Tanto Gleick como Muller quieren que nos percatemos de que el tiempo es algo fundamental para nuestra experiencia: que tener un ahora es, de hecho, lo que nos permite tener una experiencia. Incluso aunque viajar al pasado sea una fantasía, la física del tiempo engloba casi todo lo que estudiamos los físicos. Comprender la manera en que fluye el tiempo tal vez nos brinde una imagen más completa de nuestro cambiante universo.

—Andrew Jaffe
Colegio Imperial de Londres

Artículo original publicado en *Nature* 537, página 616, 29 de septiembre de 2016. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature



THE ORIGIN AND NATURE OF LIFE ON EARTH
THE EMERGENCE OF THE FOURTH GEOSPHERE
Eric Smith y Harold J. Morowitz
Cambridge University Press, 2016

La vida como proceso planetario

La emergencia de la biosfera

Al abordar el origen de la vida nos enfrentamos a una de las cuestiones más importantes y espinosas que el hombre, en particular si es científico, se plantea. Otras afectan también a los orígenes: el del universo, el de la consciencia o el de la propia humanidad. Hasta hace no tanto, todos ellos fueron dominios reservados a la especulación filosófica, por más que hubiera incursiones más o menos anecdóticas de la ciencia. Esta comenzó a interesarse de una manera sistemática por el origen de la vida a mediados del siglo xx, tras el descubrimiento de la estructura helicoidal del ADN.

A medida que se ha ido avanzado en su solución, el problema se ha complicado cada vez más. Los científicos se percataron de que no era suficiente con crear la materia prima de la vida. Necesitaban explicar cómo se conjugaron esos componentes y cómo evolucionaron hasta formarse las primeras células. La vida no requería solo los ingredientes correctos, sino también las herramientas moleculares debidas. En las postrimerías de los años sesenta, Francis Crick, Carl Woese y Leslie Orgel propusieron, cada uno por su cuenta, que el ARN podría desempeñar ambas funciones. Lo que terminó por llamarse el «mundo de ARN» es la hipótesis que sostiene que el ARN existió mucho antes que el ADN, catalizaba su propia reproducción y ayudó al advenimiento de la vida [*véase* «Origen de la vida sobre la Tierra», por Leslie E. Orgel; Investigación y Ciencia, diciembre de 1994]. Otros le negaron ese privilegio al ARN y primaron diversos escenarios de síntesis de las biomoléculas fundamentales; presentaron un mundo peptídico, uno lipídico o el metabolismo para explicar el origen de la vida. A la postre, las opiniones convergen en dos corrientes principales: el mundo de ARN (o «genes primero»), que aportó la información genética y sirvió de catalizador enzimático; y el denominado «metabolismo primero», que apela a la existencia de catalizadores metálicos sencillos, hallados en los minerales y creadores de una sopa de bloques orgánicos de construcción que habrían dado origen a otras biomoléculas [*véase* «El origen de la vida», por Robert Shapiro, Investigación y Ciencia, agosto de 2007; *y* «El origen de la vida», por Alonso Ricardo y Jack Szostak, Investigación y Ciencia, noviembre de 2009].

En un experimento realizado en 2014, Svatopluk Civiš, del Instituto de Química Física de Praga, y su equipo proyectaron un láser de un kilojulio sobre una solución de formamida que contenía también

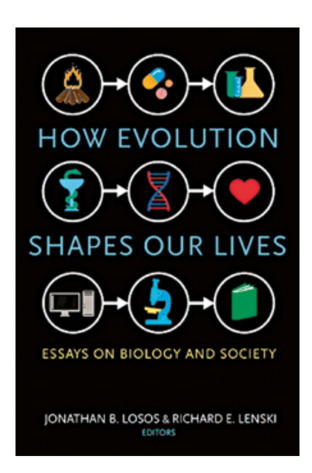
arcilla. En esa solución se quería representar la sopa química de la superficie de la Tierra inicial. Los pulsos láser, de un tercio de nanosegundo de duración, generaban una presión intensa, con picos de temperatura de 4200 grados Celsius y una cascada de radiación que incluía el ultravioleta y los rayos X. Tales eran las condiciones que cabría esperar cuando un cuerpo celeste, como un cometa o un asteroide, impactase contra el planeta. Las reacciones desencadenadas en el experimento, además de producir sustancias como ácido cianhídrico, monóxido de carbono, amoníaco y metanol, crearon las cuatro nucleobases del ARN. Con anterioridad se había demostrado que algunas clases de meteoritos contenían ya nucleobases; en particular, adenina y guanina. Pero el experimento de Civiš mostró que, además de liberar nucleobases, los cuerpos celestes podían crearlas al chocar contra el planeta.

La investigación sobre el origen de la vida se ha centrado a menudo en la síntesis química, sin prestar la atención requerida al entorno. El análisis bioenergético de los organismos primitivos sugiere que la vida comenzó en volcanes submarinos y chimeneas hidrotermales. Las reacciones químicas liberadoras de energía se encuentran en el corazón de los procesos vivos de todos los organismos. Esas reacciones bioenergéticas tienen miríadas de sustratos y productos, pero su subproducto capital es ahora el ATP (adenosín trifosfato), que es la principal moneda de energía metabólica. Las chimeneas hidrotermales revelan unos estrechísimos parecidos entre las reacciones geoquímicas liberadoras de energía y la fisiología de acetógenos y metanógenos. No es fácil desenredar el registro fósil de los primeros microorganismos, pero existe un acuerdo general en que la vida compleja emergió durante el Arcaico, hace entre 4000 y 2500 millones de años.

El origen de la vida continúa siendo un arcón de paradojas. Para que apareciera, hubo de darse una molécula genética (algo que se asemejara al ADN o al ARN) capaz de establecer las pautas de síntesis de proteínas, las moléculas funcionales de la vida. Pero las células modernas no pueden copiar ADN y ARN sin el concurso de las propias proteínas. Y lo que es peor, ninguna de estas moléculas puede acometer su tarea sin ácidos grasos, que aportan las membranas celulares necesarias para su confinamiento. En una complicación más del tipo de la del huevo y la gallina, las enzimas (codificadas por moléculas genéticas) son necesarias para sintetizar lípidos. Una aporía cuya solución se sugirió en 2015: de acuerdo con ella, un par de compuestos sencillos y que abundarían en la Tierra incipiente pudieron dar origen a una red de reacciones simples dotada de la facultad para producir las tres clases de biomoléculas (ácidos nucleicos, aminoácidos y lípidos). Aquel trabajo, dirigido por John Sutherland, de la Universidad de Cambridge, y publicado en *Nature Chemistry,* no demostraba que así hubiera empezado la vida, pero sí ayudaba a explicar un misterio clave, al avanzar una forma en la que casi todos los bloques de construcción de la vida pudieron conjugarse en un mismo episodio geológico.

Eric Smith y Harold J. Morowitz extienden el problema a un territorio no menos controvertido: ¿fue la vida un fenómeno inevitable? Dadas las condiciones singulares, físicas y químicas, requeridas para la aparición de la vida sobre la Tierra y los obstáculos inmensos que habría que vencer en aquel medio inhóspito, lo más que la comunidad científica se sentía dispuesta a aceptar era la concurrencia de un fenómeno azaroso, para no hablar de milagro. En cambio, en *The origin and nature of life on Earth* se sustituye el azar por la necesidad y se postula la inevitabilidad de la vida. La vida habría brotado del entorno, de la misma manera que los rayos liberan la acumulación de carga eléctrica en las nubes de tormentas. Y lo que emergió en la Tierra pudo haber sucedido en cualquier otro planeta similar [*véase* «El origen de la vida», por James Trefil, Harold J. Morowitz y Eric Smith; Investigación y Ciencia, septiembre de 2009].

—Luis Alonso



HOW EVOLUTION SHAPES OUR LIVES
ESSAYS ON BIOLOGY AND SOCIETY
Dirigido por Jonathan B. Losos y Richard E. Lenski
Princeton University Press, 2016

Repercusiones de la evolución

En nuestra vida individual y social

No tenemos dificultad para pensar en la evolución como algo sucedido en el pasado, que ocurrió en la naturaleza y cuya repercusión en la sociedad resulta irrelevante desde la óptica temporal de una vida humana. Como algo perteneciente a un tiempo remoto, para ser recordado en museos, donde se exponen los hitos principales a través de restos fósiles de faunas y floras que vivieron, por lo común, hace decenas o cientos de millones de años. La ciencia, sin dejar de encarar el pasado y el futuro, se mueve por otros derroteros y también nos da a conocer la naturaleza real de la evolución en su nivel más determinante, el molecular.

El campo de la evolución molecular se ocupa de los cambios evolutivos que operan en los genes y genomas, así como de las fuerzas subyacentes que gobiernan esos cambios. Los estudios en curso sobre evolución molecular son, casi en exclusividad, retrospectivos, centrados en las mutaciones que se fijaron antaño. Ahora bien, puesto que solo ha quedado fijada una mínima fracción de todas las mutaciones que se han producido durante la evolución, se nos presenta un curso sesgado e incompleto del proceso evolutivo. Con el fin de obviar esa limitación, hay que abordar el panorama entero de adaptación de un gen y así comprender, prospectivamente, las oportunidades y las necesidades en la evolución. El efecto de una mutación sobre el fenotipo depende a menudo de la presencia de mutaciones adicionales. Este fenómeno, conocido como epistasis, explica las interacciones letales sintéticas,

en las que una combinación de dos mutaciones individualmente viables provoca la muerte, y las interacciones de compensación, en las que el coste en adaptación se reduce por una segunda mutación. La epistasis desempeña un papel principal en la evolución: determina la accesibilidad de vías mutacionales y, por consiguiente, influye en la tasa de adaptación, así como en la diversidad y robustez de las variantes genéticas. No obstante, se sabe muy poco sobre la distribución espacial de esas interacciones en el interior de los genes. El enorme espacio mutacional de un gen típico plantea un reto considerable a la caracterización de los panoramas de adaptación. Por ejemplo, hay un total de 4^{100} (del orden de 10^{60}) variantes posibles de un gen de ARN de 100 nucleótidos, y un total de 20^{100} (del orden de 10^{130}) para una proteína de 100 aminoácidos.

En este libro se exploran las implicaciones de esa realidad en la vida y en la sociedad humanas. Veintitrés ensayos que explican por qué comprender la evolución es crucial para abordar el cambio climático, asegurar el suministro de alimentos, proteger la salud y la supervivencia, conocer al hombre y su comportamiento ligado al lenguaje. Aborda la función de la evolución en el envejecimiento, la cognición, la cooperación, la religión, los medios, la ingeniería, la ciencia de la computación y otras muchas áreas. De la evolución humana a la evolución de la resistencia a los antibióticos, de la evolución cultural a la importancia cultural del pensamiento evolutivo. La tecnología, las instituciones y el lenguaje que conformaron las sociedades actuales reflejan procesos de evolución cultural que emergieron de su contrapartida natural gracias a la celeridad y flexibilidad de los sistemas culturales.

Cuando Charles Darwin publicó *The descent of man* en 1871, empleó el método de comparación para explicar el sentido de nuestra especie. Esto es, atendía a las semejanzas y diferencias en la aparición de la conducta de los humanos y de nuestros parientes próximos para indicar cómo llegamos a ser. En su tiempo se habían descubierto huesos de neandertales, pero no se conocían entonces restos fósiles de homínidos. Ahora contamos ya con un amplio muestrario de homínidos fósiles. Los seres humanos son los únicos representantes vivos de un linaje, los homininos, que divergieron de otros primates hace entre seis y ocho millones de años. Los homininos quedaron confinados en África durante unos dos tercios de su historia. Con un cuerpo y un cerebro del tamaño de los de un chimpancé, los primeros homininos se diversificaron en linajes diversos con distintas estrategias alimentarias. Uno de ellos siguió el camino que llevaba a la creación de la técnica, la compartición del alimento, la caza y la recolección; dio origen al género *Homo* hace entre dos y tres millones de años.

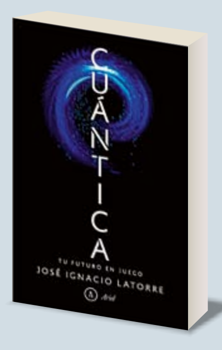
Conforme las poblaciones de *Homo* se dispersaron por el mundo, fundaron poblaciones regionales con sus propios rasgos anatómicos y genéticos distintivos. En el curso de los últimos 100.000 años, una dispersión masiva de humanos fuera de África absorbió y sustituyó a esas poblaciones preexistentes. Los humanos continuaron en su evolución. Pero comenzaron a domeñar el poder de esa evolución mediante la mejora selectiva de plantas y animales para su alimentación, materiales para su indumentaria y transporte. La emergencia de la agricultura cambió el entorno y guio la evolución consiguiente.

La evolución aplicada a la salud es un fenómeno bastante nuevo. Durante muchos años, la ciencia creyó que la evolución favorecía a parásitos y patógenos que fueran inocuos para sus huéspedes. Desde esa perspectiva, un parásito muy violento sería una aberración transitoria, indicativa de un patógeno que habría saltado a un nuevo huésped y que, con el decurso del tiempo, evolucionaría hacia una forma menos virulenta. Pero esa tesis ha sido puesta en cuestión. Los antibióticos que sistemáticamente han venido desarrollando investigadores y laboratorios farmacéuticos para tratar las infecciones bacterianas fueron aclamados como el triunfo de la técnica sobre la naturaleza. Hasta hace escasos decenios, no se vencieron las infecciones peligrosas en los países desarrollados. Esa situación pacífica se alteró en los ochenta del siglo pasado con la epidemia del sida. La sociedad asiste a la aparición de enfermedades emergentes y reemergentes, que amenazan a todos los países, incluidos los avanzados: virus SARS, virus H5N1 y cepas bacterianas resistentes a los fármacos.

¿Cómo hemos llegado los humanos a ser la especie dominante sobre la Tierra? La agricultura, la medicina y otras innovaciones tecnológicas son elementos innegables de esa historia. Pero el desarrollo de la técnica dependió de la emergencia de otros rasgos, incluidos el lenguaje y la cultura, que permiten la comunicación entre individuos y a través de generaciones.

—*Luis Alonso*

NOVEDADES



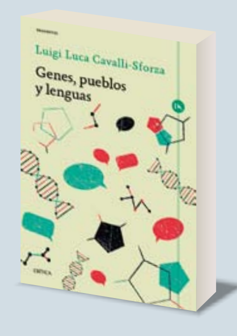
CUÁNTICA
TU FUTURO EN JUEGO

José Ignacio Latorre
Ariel, 2017
ISBN: 978-84-344-2539-2
160 págs. (16,90 €)



EMBRIOLOGÍA EN LA PERIFERIA
LAS CIENCIAS DEL DESARROLLO EN LA ESPAÑA DE LA II REPÚBLICA Y EL FRANQUISMO

Raúl Velasco Morgado
Editorial CSIC, 2016
ISBN: 978-84-00-10162-6
393 págs. (33,65 €)



GENES, PUEBLOS Y LENGUAS

Luca Cavalli-Sforza
Crítica, 2017
ISBN: 978-84-16771-55-4
240 págs. (16,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Marzo 1967

Comer ballenas

«Gifford B. Pinchot, de la Universidad Johns Hopkins, ha propuesto criar ballenas planctívoras en cautividad con el doble propósito de abastecer de alimento a la creciente población humana y salvar de la extinción a esos mamíferos. Como granjas de esas ballenas sugiere que podrían emplearse los atolones coralinos del Pacífico. Un aspecto importante de ese plan sería el aporte de nutrientes al agua de los atolones para aumentar la producción de plancton. Señala Pinchot: "Esas ballenas filtradoras ocupan una posición casi única en la cadena trófica marina, dado su tamaño y el hecho de que coman zooplancton. Si las exterminásemos, se perdería para siempre ese eficacísimo mecanismo de conversión de vegetales en proteína animal".»

Imanes más potentes

«En un gran número de aplicaciones importantes, los imanes superconductores dan ya mejores y más económicas prestaciones que los equivalentes clásicos. Parece probable, además, que en un futuro no muy lejano, la creciente necesidad de campos magnéticos más intensos y menos costosos en numerosas áreas de la ciencia y la técnica será satisfecha por los imanes superconductores. En el Laboratorio Nacional de Imanes de Cambridge, en Massachusetts, se han conseguido campos de hasta 250.000 gauss con un electroimán clásico, pero la potencia eléctrica que este consume es del orden de los 16 millones de vatios, la necesaria para una población de unos 15.000 habitantes.»



Marzo 1917

Un auto volador

«Una lujosa limusina de carrocería esmeradamente acabada, con sus tres ocupantes confortablemente acomodados en unos asientos de tapicería muy bien diseñada, que corre veloz por una carretera o se eleva en el aire merced a sus cortas alas y alcanza enseguida más de cien kilómetros por hora exhibiendo la maniobrabilidad propia de los modernos aeroplanos. Esos son los rasgos del autoplano (*véase ilustración*) mostrado en la reciente Exposición Aeronáutica Panamericana celebrada en Nueva York. El diseño del autoplano se debe a Glenn H. Curtis y sus ingenieros. "Es una máquina pensada para venderse por unos 10.000 dólares [190.000 dólares de 2017]".»



«AUTOPLANO» DE 1917: En parte auto, en parte aeroplano, todo un lujo.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXVI, N.º 12, 24 DE MARZO DE 1917

Trabajo femenino

«Una consecuencia de la guerra en Europa que ha reclamado atención general es el empleo de mujeres en las fábricas de munición. El aspecto más serio del empleo femenino en trabajos mecánicos es de índole económica. En Inglaterra, Francia, Canadá, y también en Alemania, la cuestión es en gran parte patriótica, y los salarios que se pagan a las mujeres son inferiores a los que recibían los hombres a los que sustituyen. Al acabar la guerra, ¿seguirán buscando las mujeres este tipo de empleos? ¿Les pagarán sus empleadores unos sueldos más altos que ahora? Y lo más importante de todo: ¿qué será del ejército de hombres, con familias a sus espaldas, cuando regresen de la guerra y se encuentren sus puestos ocupados por mujeres, la mayoría de ellas solteras? Las necesidades de hoy están cimentando las bases de unos problemas futuros de una gravedad, un alcance y un cariz revolucionario máximos.»



Marzo 1867

Tráfico moderno: ferrocarriles y canales

«Hay que descartar el engorroso sistema de "trenes" para el tráfico de gran velocidad y recurrir a vehículos simples que reúnan en una sola unidad la máquina, el ténder y el coche, en los que cincuenta pasajeros pudieran viajar a una media de cien kilómetros por hora a un precio razonable, y en los que se desplazaran cuarenta o cincuenta toneladas de peso total. Hoy la gran limitación a la rapidez de los ferrocarriles es el gran peso y la inestabilidad de los vehículos, lo que supone un gran desperdicio de potencia y un aumento del riesgo a velocidades elevadas. Salvo para los transportes urgentes, en lo que respecta al tráfico de mercancías debemos recuperar y modernizar el vehículo acuático, que cubriría todas las partes del país con una red de ríos y canales para vapores de unas 250 toneladas de arqueo.»

COSMOLOGÍA

Y el universo hizo «pop»

Anna Ijjas, Paul J. Steinhardt y Abraham Loeb

Las últimas medidas astronómicas, unidas a problemas de carácter teórico, ponen en duda el arraigado modelo inflacionario del universo primitivo y plantean la necesidad de nuevas ideas.





METROLOGÍA

El nuevo kilogramo

Tim Folger

Se acerca el final del prolongado esfuerzo emprendido para la sustitución del decadente objeto del siglo XIX que define el kilogramo.

MODELIZACIÓN

Las ecuaciones del cáncer

Guillermo Lorenzo, Guillermo Vilanova y Héctor Gómez

Los avances en modelización y simulación numérica nos permiten predecir el crecimiento de tumores y diseñar nuevas formas de tratamiento de forma personalizada. Las matemáticas nos ofrecen una nueva arma en la batalla contra el cáncer.

EVOLUCIÓN

La paradoja del ejercicio

Herman Pontzer

El estudio de cómo el organismo quema las calorías ayuda a explicar por qué la actividad física sirve de poco para moderar el peso, así como el modo en que adquirimos algunos de nuestros rasgos evolutivos más distintivos.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
PUBLISHER AND VICE PRESIDENT Jeremy A. Abbate

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes, El ojo de las profundidades, Cómo defender la biodiversidad y Defensor de la naturaleza*; Fabio Teixidó: *Indicios de vida en las rocas más antiguas de la Tierra y La predicción del permafrost*; Juan Manuel González Mañas: *Cerebros creados en el laboratorio*; Miguel Ángel Vázquez Mozo: *Enredados en el espaciotiempo*; Blanca Álvarez: *Terapia génica para el corazón*; Juan Pedro Adrados: *A favor de los robots desobedientes*; Carlos Lorenzo: *Origen y evolución de las aves*; Rosa Rodríguez Gasén: *La Luna, una historia llena de sorpresas*; Ramón Muñoz Tapia: *Motores mínimos (II)*; Javier Grande: *Encontrar el tiempo*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España